This binder contains 4 booklets:

1. A.Eichenwald: Cathode Rays, 1901
2. A.Eichenwald: Transmission of Energy
   Under Full Internal Refraction
   of Light. 1908
3. E.Mach: The Principle of Conservation
   of Energy. 1909
4. A.Eichenwald: Uber die magnetischen
   Wirkungen elektrischer Konvektion
   1908

Russian and German

А. Эйхенвальдъ.

КАТОДНЫЕ ЛУЧИ

ПОПУЛЯРНАЯ ЛЕКЦІЯ.



Съ 20-ю рисунками въ текстѣ.

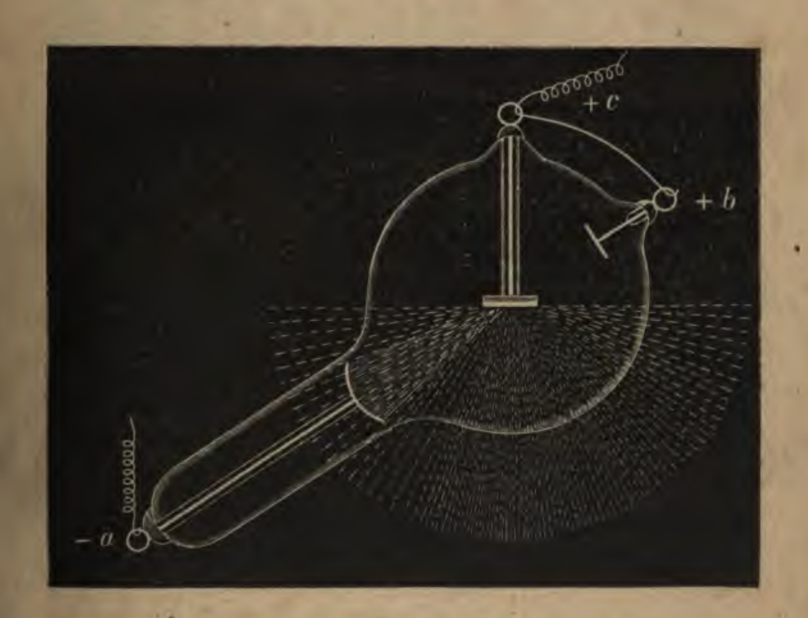
Изъ № 3-го журнала „Естествознаніе и Географія" за 1901 год

МОСКВА.
Университетская типографія, Страстной бульваръ.
1901.

А. Эйхенвальдъ.

КАТОДНЫЕ ЛУЧИ.

ПОПУЛЯРНАЯ ЛЕКЦІЯ.



Съ 20-ю рисунками въ текстѣ.

Изъ № 3-го журнала „Естествознаніе и Географія" за 1901 годъ.

МОСКВА.
Университетская типографія, Страстной бульваръ.
1901.

А. Эйхенвальдъ.

КАТОДНЫЕ ЛУЧИ.

ПОПУЛЯРНАЯ ЛЕКЦІЯ.



Съ 20-ю рисунками въ текстѣ.

Изъ № 3-го журнала „Естествознаніе и Географія" за 1901 годъ.

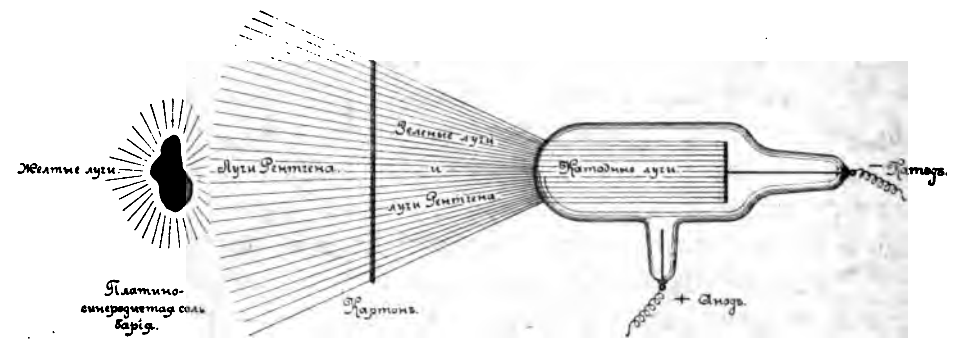
МОСКВА.
Университетская типографія, Страстной бульваръ.
1901.

которыхъ было почти совершенно оставлено за невозможностью въ них разобраться. Къ такимъ явленіямъ принадлежатъ между прочимъ и кат одные лучи, которымъ я посвящаю настоящій очеркъ. Катодные луч были открыты и изучены съ качественной стороны еще Плюккеромъ Гитторфомъ и Круксомъ въ 1860 году, однако только теперь, въ само послѣднее время, благодаря работамъ Кауфмана, Томсона и др., явилас возможность дѣлать надъ катодными лучами измѣренія, подмѣчать количе ственныя соотношенія между отдѣльными явленіями, сопровождающим катодные лучи, выражать эти соотношенія формулами, законами—одним словомъ, только въ послѣднее время возникла точная наука о катодных лучахъ. Одновременно съ этимъ оказалось, что лучи эти призваны играт громадную роль въ дальнѣйшемъ теченіи и развитіи физики и химіи, потому изученіе ихъ заслуживаетъ нашего полнаго вниманія.

Лучи катодные и лучи Рентгена.

Что-же это за катодные лучи, какое они имѣютъ отношеніе къ лу чамъ Рентгена, и каково происхожденіе тѣхъ и другихъ лучей?

Чтобы отвѣтить на этотъ вопросъ возьмемъ Рентгеновскую трубк самаго примитивнаго устройства (чер. № 1). Это будетъ короткая, за



1. Схема опыта Рёнтгена.

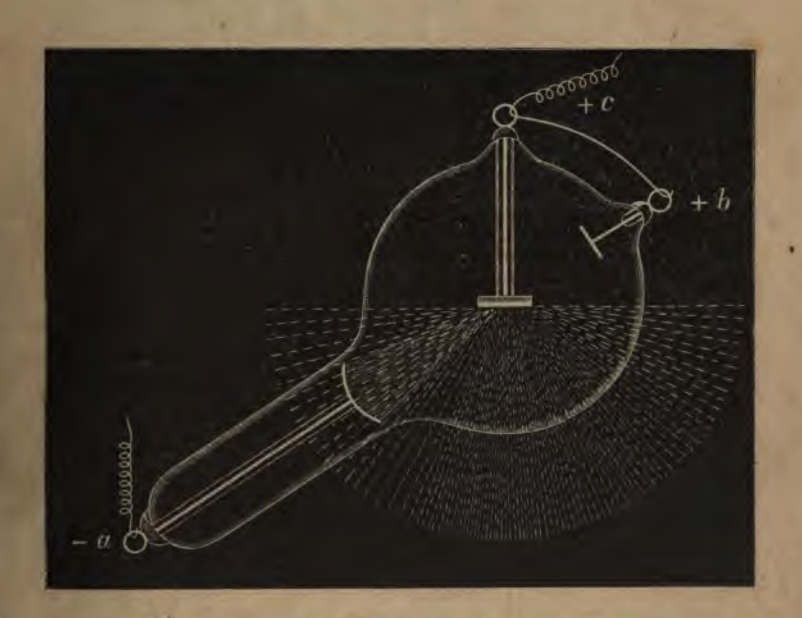
паянная съ обоихъ концовъ, стеклянная трубка съ сильно разрѣженным воздухомъ. По серединѣ трубки сдѣланъ небольшой отростокъ, въ кото рый впаяна проволока, соединенная съ положительнымъ полюсомъ, т. е съ *анодомъ* электрической машины; на одномъ изъ концовъ трубки впаян другая проволока, снабженная плоскимъ кружкомъ и соединенная съ отри цательнымъ полюсомъ или *катодомъ*.

Пустивъ электрическую машину въ ходъ, мы прежде всего замѣтимъ что все стекло трубки свѣтится зеленоватымъ свѣтомъ, въ особенност въ мѣстахъ противоположныхъ катодной пластинкѣ. Къ этимъ видимым *тами зеленымъ лучамъ* свѣта примѣшены однако еще лучи невидимые

А. Эйхенвальдъ.

КАТОДНЫЕ ЛУЧИ.

ПОПУЛЯРНАЯ ЛЕКЦІЯ.



Съ 20-ю рисунками въ текстѣ.

Изъ № 3-го журнала „Естествознаніе и Географія" за 1901 годъ.

МОСКВА.
Университетская типографія, Страстной бульваръ.
1901.



КАТОДНЫЕ ЛУЧИ*).

„Полна чудесъ могучая природа“.
(Снѣгурочка. А. Н. Островскаго).

Милостивыя государыни и милостивые государи!

Вы слышали, конечно, о поразительномъ открытіи Рентгена, — объ открытіи новыхъ лучей, обладающихъ тѣмъ замѣчательнымъ свойствомъ, что, будучи невидимы простымъ глазомъ, они тѣмъ не менѣе, при помощи особыхъ приспособленій, даютъ намъ возможность видѣть сквозь непрозрачные предметы. Рентгенъ первый показалъ намъ скелетъ живого человѣка, первый далъ возможность видѣть движеніе живого сердца, оставляя совершенно нетронутыми наружные покровы человѣческаго тѣла. Громадное значеніе открытія Рентгена для медицины—очевидно и всѣми признано. Но открытіе невидимыхъ лучей имѣло не только практическое значеніе,—оно дало сильный толчокъ къ новымъ изслѣдованіямъ въ этой области, результатомъ которыхъ было открытіе цѣлой серіи новыхъ лучей различнаго свойства, но по общему своему характеру подобныхъ Рентгеновскимъ. Съ другой стороны физики, вдохновленные Рентгеномъ, съ новой энергіей стали изучать явленія, происходящія внутри тѣхъ трубокъ съ сильно разрѣженнымъ воздухомъ, изъ которыхъ появились лучи Рентгена, т. е. явленія, которыя давно уже были извѣстны, но изученіе

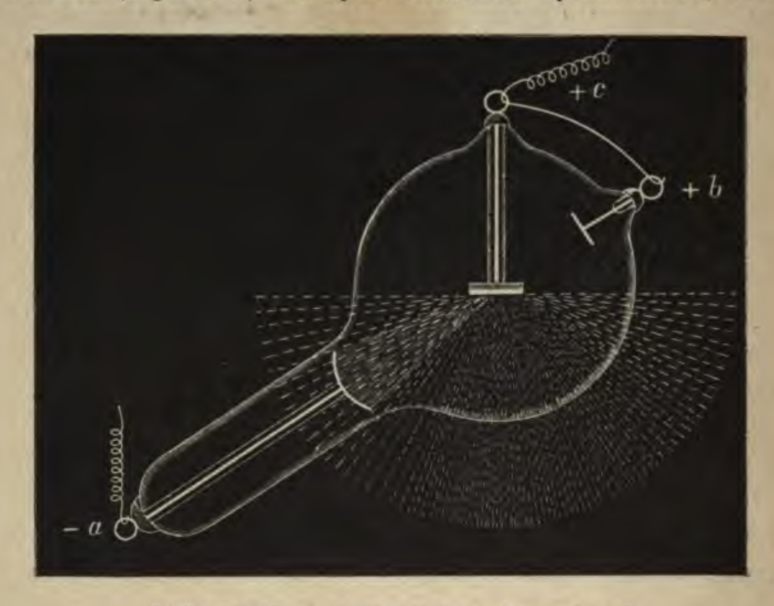
---

*) Популярная лекція, читанная 25 октября 1900 года въ аудиторіи Историческаго *музея, въ пользу Общества* вспомоществованія учащимся женщинамъ въ Москвѣ. Почти *опыты, описанные здѣсь, были* показаны во время чтенія лекціи.

Итакъ, весь механизмъ описываемаго явленія съ трубкою Рентгена происходитъ слѣдующимъ образомъ.

Электрическая энергія, посылаемая нами въ Рентгенову трубку, превращается на катодѣ въ катодные лучи, которые, попадая на стекло трубки, заставляютъ его испускать смѣсь зеленыхъ лучей свѣта съ лучами Рентгена. Посредствомъ картона мы отфильтровываемъ эту смѣсь и, прошедшіе черезъ картонъ Рентгеновы лучи, превращаются въ баріевой соли въ обыкновенные видимые нашимъ глазомъ лучи желтаго цвѣта.

Впрочемъ не только стекло имѣетъ свойство превращать катодные лучи въ лучи Рентгена, почти всѣ тѣла имѣютъ это свойство и въ особенно сильной степени платина. Вотъ почему въ современныхъ трубкахъ Рентгена (чер. № 2) на пути катодныхъ лучей помѣщаютъ плати-



2. Трубка Рёнтгена съ платиновой пластинкой.

новый кружокъ, который и служитъ при этомъ сильнымъ источникомъ Рентгеновскихъ лучей.

Для наблюденія лучей употребляется картонъ (такъ называемый экранъ), окрашенный со стороны противоположной трубкѣ платино-синеродистой солью барія. Помѣщая между трубкой и экраномъ различные предметы, мы можемъ видѣть ихъ тѣни на экранѣ и судить о ихъ большей или меньшей проницаемости для Рентгеновыхъ лучей. Мы сразу замѣтимъ, что свинецъ и всѣ тяжелые металлы даютъ сильную тѣнь, они *непрозрачны* для Рентгеновыхъ лучей, легкій алюминій, напротивъ того, *пропускаетъ ихъ почти цѣликомъ*. Кости оказываются менѣе прозрачными *нежели мускулы*, и это даетъ намъ возможность видѣть силуэты костей *сквозь мускулы и кожу*.

Возьмемъ свинцовую пластинку и сдѣлаемъ въ ней два окошечка; одно изъ нихъ закроемъ стекломъ, другое алюминіемъ. Для обыкновеннаго свѣта первое прозрачно, второе—нѣтъ, для лучей Рентгена окажется какъ разъ наоборотъ алюминіево окошечко прозрачнѣе стекляннаго.

Несмотря однако на такое различіе между Рентгеновскими лучами и лучами свѣта, между ними есть и много сходнаго. И тѣ и другіе могутъ вызывать свѣченіе или люминисценцію, и тѣ и другіе дѣйствуютъ на фотографическую пластинку. Далѣе, въ обыкновенномъ свѣтѣ мы имѣемъ лучи ультра-красные и ультра-фіолетовые, которые тоже невидимы простымъ глазомъ, какъ и лучи Рентгена. Наконецъ прозрачность тѣлъ для различныхъ лучей свѣта весьма различна. Такъ, напримѣръ, прозрачная для видимыхъ лучей вода непрозрачна для ультра-красныхъ лучей, стекло непрозрачно для ультра-фіолетовыхъ лучей; наоборотъ—растворъ іода въ сѣрнистомъ углеродѣ, совершенно непрозрачный для видимыхъ лучей, хорошо пропускаетъ лучи ультра-красные и отчасти ультра-фіолетовые. Металлы въ видѣ очень тонкихъ пластинокъ тоже пропускаютъ свѣтъ, и Кундту даже удалось сдѣлать въ высшей степени тонкія металлическія призмы и опредѣлить въ нихъ преломленіе свѣта.

Изъ этихъ примѣровъ мы видимъ, что намъ уже не въ первый разъ приходится встрѣчаться въ физикѣ съ явленіемъ прохожденія лучей сквозь непрозрачные предметы и поэтому отличіе Рёнтгеновыхъ лучей отъ свѣтовыхъ является скорѣе количественнымъ, чѣмъ отличіемъ по существу. Новѣйшія изслѣдованія надъ лучами Рентгена заставляютъ предполагать, что мы имѣемъ здѣсь дѣло съ такими же колебаніями эѳира, какъ и въ другихъ извѣстныхъ намъ видимыхъ и невидимыхъ лучахъ. Только эти колебанія очень часты, длина волнъ Рентгеновскихъ лучей очень мала, разъ въ 1000 меньше длины волнъ желтаго цвѣта *).

Можемъ ли мы то же самое сказать и про катодные лучи?

Нѣтъ, не можемъ. Какъ увидимъ ниже, катодные лучи обладаютъ совершенно исключительными свойствами.

Происхожденіе катодныхъ лучей.

Однако раньше чѣмъ описывать свойства катодныхъ лучей, намъ нужно еще отвѣтить на вопросъ поставленный выше, а именно, каково

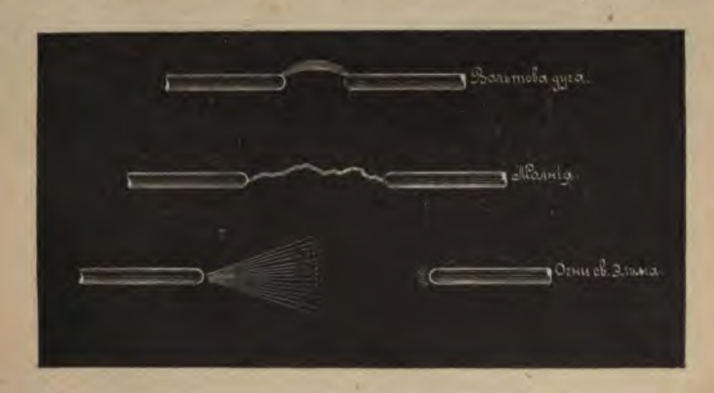
*) Длина волны желтаго свѣта испускаемаго парами натрія равна 0,0006 миллим.
Длина наибольшей ультра-красной волны полученной Рубенсомъ " 0,0600 "
Длина " " " видимой глазомъ " 0,0007 "
Длина наименьшей фіолетовой " " " " 0,0003 "
Длина " " " полученной Шуманомъ " 0,0001 "
Длина волны Рентгеновыхъ лучей по измѣреніямъ Тага и Винда " 0,000001

ихъ происхожденіе. Мы уже знаемъ, что Рентгеновы лучи происходятъ изъ катодныхъ; какимъ же образомъ появляются послѣдніе? — Катодные лучи появляются при проходѣ электрическаго тока черезъ разрѣженный воздухъ или какой-либо другой газъ.

При изслѣдованіи катодныхъ лучей, мы наталкиваемся, слѣдовательно, прежде всего на изслѣдованіе электрическаго разряда въ разрѣженномъ газѣ.

Прохожденіе электрическаго тока черезъ газъ вообще—явленіе еще очень мало изслѣдованное и, повидимому, очень сложное. Сколько тысячелѣтій человѣкъ наблюдаетъ электрическій разрядъ въ атмосферѣ въ видѣ молніи, сколько человѣческихъ жизней было принесено въ жертву, при изученіи этого грознаго явленія, и до сихъ поръ оно остается для насъ загадкой. Правда, древніе греки и не заботились особенно надъ ея разгадываніемъ, да и кто-же будетъ разгадывать капризы Зевса громовержца? Но позднѣе люди не могли удовлетвориться такими воззрѣніями. Уже Франклинъ и Гальвани знали, что молнія есть электрическій разрядъ,— такой же, какой получается въ электрической машинѣ, но только гораздо большихъ размѣровъ. Однако вся бѣда въ томъ, что разрядъ этотъ и въ малыхъ размѣрахъ остается еще большой загадкой.

Мы только что пользовались для опытовъ Рентгена электрической машиной или спиралью Румкорфа; соединимъ теперь ея полюсы съ двумя короткими проволоками, между которыми, какъ вы видите, перескакиваетъ искра (чер. № 3). При небольшомъ разстояніи между проволоками искра



3. Различные типы электрическихъ разрядовъ.

получается широкая, красноватаго цвѣта. Это то же, что вольтова дуга въ нашихъ уличныхъ электрическихъ фонаряхъ. При большихъ разстояніяхъ искра дѣлается тоньше и получаетъ зигзагообразную форму, точь въ точь такую, какую мы наблюдаемъ обыкновенно во время грозы. При дальнѣйшемъ раздвиганіи проволокъ, искры становятся все рѣже и рѣже

и наконецъ мы видимъ только слабое сіяніе у концовъ проволокъ, напоминающее собою явленіе, извѣстное подъ именемъ огней святого Эльма. Изъ этой спирали Румкорфа мы не можемъ получить искры болѣе 20 сантиметровъ длины, но есть аппараты, дающіе искры въ метръ и даже болѣе. Самыя длинныя искры, которыя удалось получить лабораторнымъ путемъ, имѣли длину около двухъ саженей, тогда какъ длина молніи измѣряется верстами.... Вы видите, что намъ далеко еще до громовержцевъ!...

Посмотримъ теперь, что будетъ происходить въ газахъ разрѣженныхъ.

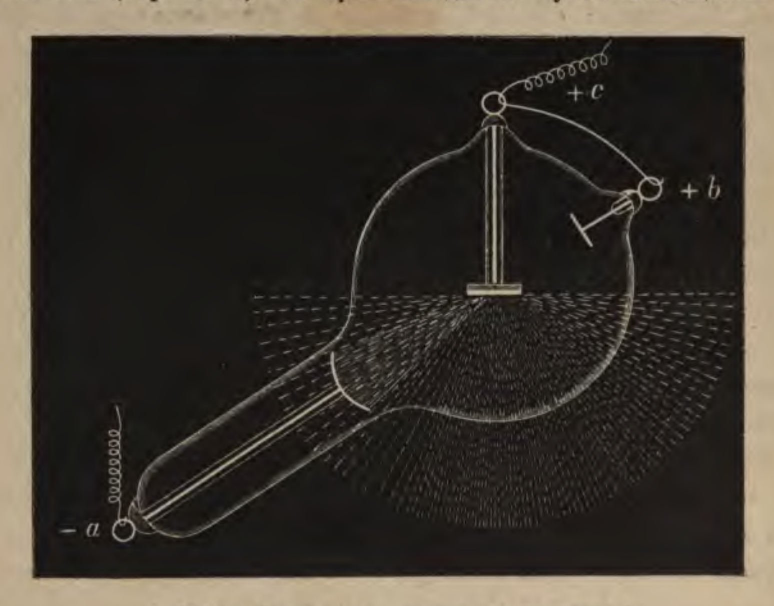
Возьмемъ стеклянную трубку длиною въ два метра, поставимъ ее на воздушный насосъ и, во время выкачиванія воздуха, будемъ пропускать черезъ нее электрическій токъ. Вначалѣ, черезъ трубку такой длины не пойдетъ никакого тока, такъ какъ наша спираль Румкорфа даетъ искры всего только въ 20 сантиметровъ; однако, по мѣрѣ выкачиванія, мы сперва замѣтимъ въ концахъ трубки появленіе тонкихъ зигзагообразныхъ молній, которыя мелкими, острыми искорками разсыпаются по внутренней стѣнкѣ трубки; эти искорки все удлиняются, ихъ становится все больше и больше и вотъ, когда давленіе воздуха уменьшилось въ 20 — 30 разъ противъ атмосфернаго, онѣ мгновенно обращаются въ одно сплошное, спокойное сіяніе розоваго цвѣта съ мягкими, размытыми контурами.—Какое неожиданное превращеніе!—Гдѣ та теорія, которая могла-бы предсказать это явленіе?—Смотря на переливы этого яркаго столба свѣта въ два метра вышиною, невольно приходитъ въ голову, что и обыкновенная грозовая молнія могла-бы обратиться въ такое-же мягкое сіяніе, если бъ нашъ воздухъ былъ въ болѣе разрѣженномъ состояніи. Но вѣдь мы знаемъ, что въ верхнихъ слояхъ атмосферы воздухъ сильно разрѣженъ, и можно даже точно указать высоту, гдѣ давленіе воздуха равно $^1/_{30}$ атмосферы. Тамъ, на этой высотѣ навѣрно происходятъ тоже какіе-либо электрическіе разряды. Не имѣемъ ли мы въ нашей трубкѣ хотя слабое подобіе сѣвернаго сіянія?—Предположеніе это весьма вѣроятно. Но мы не будемъ отвлекаться отъ главнаго предмета нашего изслѣдованія и будемъ продолжать дальнѣйшую откачку воздуха изъ трубки.

Мы уже дошли теперь до давленія $^1/_{100}$ атмосферы и пока никакихъ измѣненій въ формѣ разряда незамѣтно. Откачать воздухъ еще сильнѣе этимъ поршневымъ насосомъ мы не можемъ, для этой цѣли употребляются болѣе совершенные ртутные насосы. Въ ртутныхъ насосахъ нѣтъ ни поршней, ни клапановъ и принципъ ихъ устройства очень простъ. Представьте себѣ узкую вертикальную трубку, черезъ которую по капелькамъ падаетъ ртуть. Капельки ртути увлекаютъ съ собою и воздухъ, и подливая все новой и новой ртути мы можемъ достичь очень сильнаго разрѣженія *воздуха во всѣхъ* сосудахъ соединенныхъ съ вышеупомянутой вс

Итакъ, весь механизмъ описываемаго явленія съ трубкою Рентгена происходитъ слѣдующимъ образомъ.

Электрическая энергія, посылаемая нами въ Рентгенову трубку, превращается на катодѣ въ катодные лучи, которые, попадая на стекло трубки, заставляютъ его испускать смѣсь зеленыхъ лучей свѣта съ лучами Рентгена. Посредствомъ картона мы отфильтровываемъ эту смѣсь и, прошедшіе черезъ картонъ Рентгеновы лучи, превращаются въ баріевой соли въ обыкновенные видимые нашимъ глазомъ лучи желтаго цвѣта.

Впрочемъ не только стекло имѣетъ свойство превращать катодные лучи въ лучи Рентгена, почти всѣ тѣла имѣютъ это свойство и въ особенно сильной степени платина. Вотъ почему въ современныхъ трубкахъ Рентгена (чер. № 2) на пути катодныхъ лучей помѣщаютъ плати-



2. Трубка Рёнтгена съ платиновой пластинкой.

новый кружокъ, который и служитъ при этомъ сильнымъ источникомъ Рентгеновскихъ лучей.

Для наблюденія лучей употребляется картонъ (такъ называемый экранъ), окрашенный со стороны противоположной трубкѣ платино-синеродистой солью барія. Помѣщая между трубкой и экраномъ различные предметы, мы можемъ видѣть ихъ тѣни на экранѣ и судить о ихъ большей или меньшей проницаемости для Рентгеновыхъ лучей. Мы сразу замѣтимъ, что свинецъ и всѣ тяжелые металлы даютъ сильную тѣнь, они непрозрачны для Рентгеновыхъ лучей, легкій алюминій, напротивъ того, пропускаетъ ихъ почти цѣликомъ. Кости оказываются менѣе прозрачными чемъ мускулы, и это даетъ намъ возможность видѣть силуэты костей сквозь мускулы и кожу.

Возьмемъ свинцовую пластинку и сдѣлаемъ въ ней два окошечка; одно изъ нихъ закроемъ стекломъ, другое алюминіемъ. Для обыкновеннаго свѣта первое прозрачно, второе—нѣтъ, для лучей Рентгена окажется какъ разъ наоборотъ алюминіево окошечко прозрачнѣе стекляннаго.

Несмотря однако на такое различіе между Рентгеновскими лучами и лучами свѣта, между ними есть и много сходнаго. И тѣ и другіе могутъ вызывать свѣченіе или люминисценцію, и тѣ и другіе дѣйствуютъ на фотографическую пластинку. Далѣе, въ обыкновенномъ свѣтѣ мы имѣемъ лучи ультра-красные и ультра-фіолетовые, которые тоже невидимы простымъ глазомъ, какъ и лучи Рентгена. Наконецъ прозрачность тѣлъ для различныхъ лучей свѣта весьма различна. Такъ, напримѣръ, прозрачная для видимыхъ лучей вода непрозрачна для ультра-красныхъ лучей, стекло непрозрачно для ультра-фіолетовыхъ лучей; наоборотъ—растворъ іода въ сѣрнистомъ углеродѣ, совершенно непрозрачный для видимыхъ лучей, хорошо пропускаетъ лучи ультра-красные и отчасти ультра-фіолетовые. Металлы въ видѣ очень тонкихъ пластинокъ тоже пропускаютъ свѣтъ, и Кундту даже удалось сдѣлать въ высшей степени тонкія металлическія призмы и опредѣлить въ нихъ преломленіе свѣта.

Изъ этихъ примѣровъ мы видимъ, что намъ уже не въ первый разъ приходится встрѣчаться въ физикѣ съ явленіемъ прохожденія лучей сквозь непрозрачные предметы и поэтому отличіе Рёнтгеновыхъ лучей отъ свѣтовыхъ является скорѣе количественнымъ, чѣмъ отличіемъ по существу. Новѣйшія изслѣдованія надъ лучами Рентгена заставляютъ предполагать, что мы имѣемъ здѣсь дѣло съ такими же колебаніями эѳира, какъ и въ другихъ извѣстныхъ намъ видимыхъ и невидимыхъ лучахъ. Только эти колебанія очень часты, длина волнъ Рентгеновскихъ лучей очень мала, разъ въ 1000 меньше длины волнъ желтаго цвѣта *).

Можемъ ли мы то же самое сказать и про катодные лучи?

Нѣтъ, не можемъ. Какъ увидимъ ниже, катодные лучи обладаютъ совершенно исключительными свойствами.

Происхожденіе катодныхъ лучей.

Однако раньше чѣмъ описывать свойства катодныхъ лучей, намъ нужно еще отвѣтить на вопросъ поставленный выше, а именно, каково

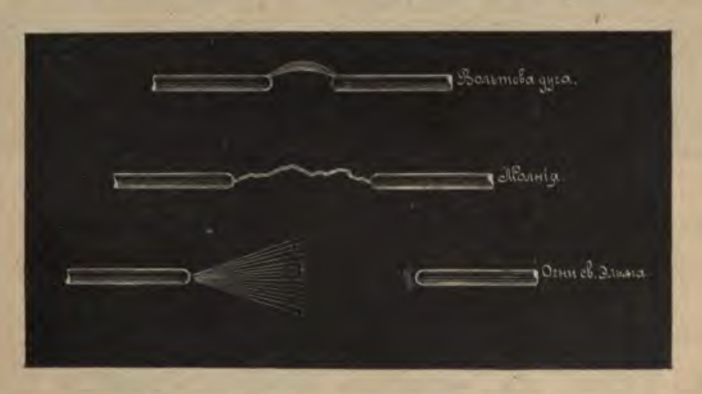
*) Длина волны желтаго свѣта испускаемаго парами натрія равна 0,0006 миллим.
Длина наибольшей ультра-красной волны полученной Рубенсомъ „ 0,0600 „
Длина „ „ „ видимой глазомъ „ 0,0007 „
Длина наименьшей фіолетовой „ „ „ „ 0,0003 „
Длина „ „ „ полученной Шуманомъ „ 0,0001 „
Длина волны Рентгеновыхъ лучей по измѣреніямъ Тата и Винда „ 0,000001

ихъ происхожденіе. Мы уже знаемъ, что Рентгеновы лучи происходятъ изъ катодныхъ; какимъ же образомъ появляются послѣдніе? — Катодные лучи появляются при проходѣ электрическаго тока черезъ разрѣженный воздухъ или какой-либо другой газъ.

При изслѣдованіи катодныхъ лучей, мы наталкиваемся, слѣдовательно, прежде всего на изслѣдованіе электрическаго разряда въ разрѣженномъ газѣ.

Прохожденіе электрическаго тока черезъ газъ вообще—явленіе еще очень мало изслѣдованное и, повидимому, очень сложное. Сколько тысячелѣтій человѣкъ наблюдаетъ электрическій разрядъ въ атмосферѣ въ видѣ молніи, сколько человѣческихъ жизней было принесено въ жертву, при изученіи этого грознаго явленія, и до сихъ поръ оно остается для насъ загадкой. Правда, древніе греки и не заботились особенно надъ ея разгадываніемъ, да и кто-же будетъ разгадывать капризы Зевса громовержца? Но позднѣе люди не могли удовлетвориться такими воззрѣніями. Уже Франклинъ и Гальвани знали, что молнія есть электрическій разрядъ,— такой же, какой получается въ электрической машинѣ, но только гораздо большихъ размѣровъ. Однако вся бѣда въ томъ, что разрядъ этотъ и въ малыхъ размѣрахъ остается еще большой загадкой.

Мы только что пользовались для опытовъ Рентгена электрической машиной или спиралью Румкорфа; соединимъ теперь ея полюсы съ двумя короткими проволоками, между которыми, какъ вы видите, перескакиваетъ искра (чер. № 3). При небольшомъ разстояніи между проволоками искра



3. Различные типы электрическихъ разрядовъ.

получается широкая, красноватаго цвѣта. Это то же, что вольтова дуга въ нашихъ уличныхъ электрическихъ фонаряхъ. При большихъ разстояніяхъ искра дѣлается тоньше и получаетъ зигзагообразную форму, точь въ точь такую, какую мы наблюдаемъ обыкновенно во время грозы. При дальнѣйшемъ раздвиганіи проволокъ, искры становятся все рѣже и рѣже

и наконецъ мы видимъ только слабое сіяніе у концовъ проволокъ, напоминающее собою явленіе, извѣстное подъ именемъ огней святого Эльма. Изъ этой спирали Румкорфа мы не можемъ получить искры болѣе 20 сантиметровъ длины, но есть аппараты, дающіе искры въ метръ и даже болѣе. Самыя длинныя искры, которыя удалось получить лабораторнымъ путемъ, имѣли длину около двухъ саженей, тогда какъ длина молніи измѣряется верстами.... Вы видите, что намъ далеко еще до громовержцевъ!...

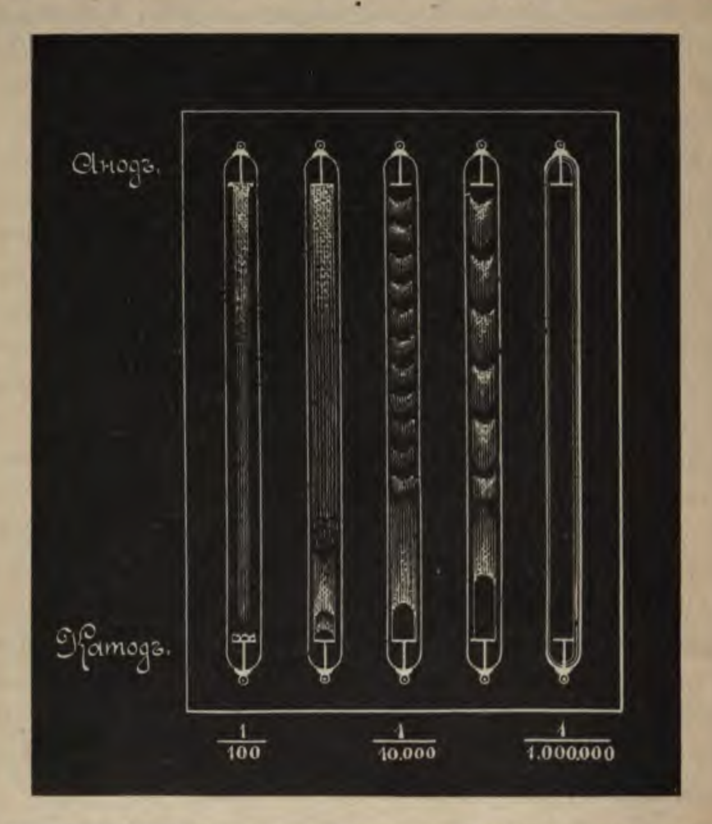
Посмотримъ теперь, что будетъ происходить въ газахъ разрѣженныхъ.

Возьмемъ стеклянную трубку длиною въ два метра, поставимъ ее на воздушный насосъ и, во время выкачиванія воздуха, будемъ пропускать черезъ нее электрическій токъ. Вначалѣ, черезъ трубку такой длины не пойдетъ никакого тока, такъ какъ наша спираль Румкорфа даетъ искры всего только въ 20 сантиметровъ; однако, по мѣрѣ выкачиванія, мы сперва замѣтимъ въ концахъ трубки появленіе тонкихъ зигзагообразныхъ молній, которыя мелкими, острыми искорками разсыпаются по внутренней стѣнкѣ трубки; эти искорки все удлиняются, ихъ становится все больше и больше и вотъ, когда давленіе воздуха уменьшилось въ 20 — 30 разъ противъ атмосфернаго, онѣ мгновенно обращаются въ одно сплошное, спокойное сіяніе розоваго цвѣта съ мягкими, размытыми контурами.—Какое неожиданное превращеніе!—Гдѣ та теорія, которая могла-бы предсказать это явленіе?—Смотря на переливы этого яркаго столба свѣта въ два метра вышиною, невольно приходитъ въ голову, что и обыкновенная грозовая молнія могла-бы обратиться въ такое-же мягкое сіяніе, если бъ нашъ воздухъ былъ въ болѣе разрѣженномъ состояніи. Но вѣдь мы знаемъ, что въ верхнихъ слояхъ атмосферы воздухъ сильно разрѣженъ, и можно даже точно указать высоту, гдѣ давленіе воздуха равно $^1/_{30}$ атмосферы. Тамъ, на этой высотѣ навѣрно происходятъ тоже какіе-либо электрическіе разряды. Не имѣемъ ли мы въ нашей трубкѣ хотя слабое подобіе сѣвернаго сіянія?—Предположеніе это весьма вѣроятно. Но мы не будемъ отвлекаться отъ главнаго предмета нашего изслѣдованія и будемъ продолжать дальнѣйшую откачку воздуха изъ трубки.

Мы уже дошли теперь до давленія $^1/_{100}$ атмосферы и пока никакихъ измѣненій въ формѣ разряда незамѣтно. Откачать воздухъ еще сильнѣе этимъ поршневымъ насосомъ мы не можемъ, для этой цѣли употребляются болѣе совершенные ртутные насосы. Въ ртутныхъ насосахъ нѣтъ ни поршней, ни клапановъ и принципъ ихъ устройства очень простъ. Представьте себѣ узкую вертикальную трубку, черезъ которую по капелькамъ падаетъ ртуть. Капельки ртути увлекаютъ съ собою и воздухъ, и подливая все новой и новой ртути мы можемъ достичь очень сильнаго разрѣженія воздуха во всѣхъ сосудахъ соединенныхъ съ вышеупомянутой

тикальной трубкой. Конструкція ртутныхъ насосовъ, основанныхъ на этом принципѣ бываетъ различна; но мы будемъ пользоваться насосомъ И. Усагина (лаборанта московскаго университета) отличающимся своей пр стотою и нѣкоторыми остроумными деталями. Этимъ насосомъ на ваших глазахъ воздухъ изъ трубки, имѣющей объемъ около 300 кубических сантиметровъ, можетъ быть выкачанъ въ 10—15 минутъ до одной ми ліонной атмосферы!

Пока будетъ происходить это откачиваніе, я обращу ваше вниман на пять, приготовленныхъ мною заранѣе, вертикальныхъ трубокъ, пом щенныхъ на общей доскѣ (чер. 4). Всѣ эти трубки совершенно один



4. Различные типы электрическихъ разрядовъ въ разрѣженномъ воздухѣ.

ковы по формѣ и по размѣрамъ, (длиною 75 см., діаметромъ $3\frac{1}{2}$ см, всѣ онѣ содержатъ воздухъ, но воздухъ доведенъ въ нихъ до различн степени разрѣженія.

Первая трубка доведена приблизительно до $^{1}/_{100}$ атмосферы и пр *пуская черезъ* нее токъ, мы замѣчаемъ въ ней опять уже знакомое на *красноватое сіяніе,* занимающее середину трубки. Сіяніе это исходитъ и *положительнаго полюса,* изъ анода, и, не доходя до катода, кончае

слегка размытою кистью. Тамъ, куда указываетъ конецъ кисти, на катодѣ замѣчается голубое сіяніе въ видѣ небольшаго грибка.

Слѣдующая трубка содержитъ воздухъ при $^1/_{1000}$ атмосферы; здѣсь анодное сіяніе расплылось, заняло всю ширину трубки, а катодный голубой грибокъ выросъ и окружаетъ катодъ со всѣхъ сторонъ.

Третья трубка выкачана до $^1/_{10000}$ атмосферы. Въ такомъ рѣдкомъ воздухѣ катодное голубое сіяніе развивается особенно сильно и оттѣсняетъ красноватое сіяніе къ аноду. Въ то же время мы замѣчаемъ въ анодномъ сіяніи новое неожиданное превращеніе: оно распадается на множество горизонтальныхъ слоевъ въ родѣ плоскихъ бусъ, нанизанныхъ одна на другую. Слои эти не стоятъ на мѣстѣ, они передвигаются взадъ и впередъ, и кажется, точно цѣлый рой бабочекъ трепещетъ надъ голубымъ цвѣткомъ распустившемся на катодѣ.

При уменьшеніи давленія еще въ десять разъ, какъ это сдѣлано въ четвертой трубкѣ, катодное сіяніе блѣднѣетъ и занимаетъ почти всю трубку; анодные слои расширились настолько, что во всей трубкѣ ихъ осталось всего только три слоя. Вообще, все свѣченіе воздуха въ трубкѣ стало блѣднѣе и, если въ первыхъ трехъ трубкахъ мы наблюдали все болѣе и болѣе легкое прохожденіе электрическаго тока по мѣрѣ выкачиванія воздуха, то теперь мы замѣтимъ обратное явленіе: электрическое напряженіе на полюсахъ трубки повышается. Кромѣ того мы замѣчаемъ здѣсь, что стекло трубки уже начинаетъ свѣтиться зеленоватымъ свѣтомъ.

Наконецъ пропускаемъ токъ черезъ послѣднюю трубку, гдѣ давленіе около одной милліонной атмосферы. Здѣсь воздухъ уже совершенно не свѣтится, за то ярко свѣтится сама трубка и испускаетъ знакомые уже намъ лучи Рентгена; здѣсь же мы имѣемъ, слѣдовательно, и катодные лучи.

Всѣ эти явленія вы можете прослѣдить и въ одной и той же трубкѣ, во время самаго выкачиванія воздуха ртутнымъ насосомъ, и, по мѣрѣ уменьшенія давленія, характеръ свѣченія будетъ мѣняться, переходя изъ одной формы въ другую.

Наблюдая форму свѣченія въ трубкѣ, мы можемъ дѣлать и обратное заключеніе о давленіи въ ней газа. Вотъ теперь, напримѣръ, мы видимъ зеленое свѣченіе трубки, значитъ—давленіе газа въ ней около одной миліонной атмосферы. Я впускаю въ трубку ничтожную капельку воздуха, и мгновенно появилось слоистое анодное свѣченіе, что соотвѣтствуетъ приблизительно $^1/_{10000}$ атмосферы. Впустивъ еще немного воздуха, мы прекращаемъ всякое свѣченіе: давленіе уже близко къ атмосферному,—электричество не можетъ пройти черезъ трубку, его напряженіе недостаточно.

Если бы мы, достигнувъ зеленаго свѣченія трубки съ катодными и *Рентгеновыми лучами,* продолжали выкачиваніе еще дальше, то по м

пусканіи тока черезъ эту трубку, колесико остается неподвижнымъ, но если поднести къ трубкѣ сѣверный или южный полюсъ магнита, то лучи



9. Мельница Крукса.

отклонятся и будутъ ударять въ верхнія или нижнія лопасти мельницы, и она начнетъ вращаться влѣво или вправо.

Не нужно однако думать, что эти опыты доказываютъ матеріальность катодныхъ лучей. Очень можетъ быть, что вращеніе тутъ происходитъ отъ нагрѣванія самого колесика катодными лучами и расширенія и движенія воздуха у нагрѣтаго мѣста. Самъ же Круксъ показалъ намъ цѣлый рядъ радіометровъ, т. е. такихъ же колесиковъ съ лопастями, движущихся отъ дѣйствія лучей свѣта и теплоты; а про эти лучи мы давно знаемъ, что они не несутъ съ собою матеріальныхъ частицъ. Вы видите теперь въ проекціи такой радіометръ Крукса (чер. № 10) и замѣтьте, какъ быстро онъ вращается подъ дѣйствіемъ лучей проекціоннаго фонаря.



10. Радіометръ Крукса.

Мы уже раньше замѣтили, что катодные лучи производятъ нагрѣваніе и даже весьма значительное, такъ какъ платина накалялась добѣла, теперь же я могу показать, что эти свойства катодныхъ лучей сохраняются ими и послѣ ихъ отклоненія магнитомъ.

Въ этой трубкѣ (чер. № 11) катодные лучи идутъ вдоль нея, слѣва направо и не попадаютъ на ея боковыя стѣнки; къ стѣнкамъ же съ нижней стороны прилѣплены воскомъ три небольшихъ дробинки. Приближеніемъ магнита я могу направить катодные лучи въ любое мѣсто трубки, напримѣръ, туда, гдѣ приклеена средняя дробинка. Вы видите, воскъ таетъ въ нѣсколько секундъ и дробинка падаетъ. Удаливъ



11. Нагрѣваніе катодными лучами.

немного магнитъ, я получаю менѣе сильное отклоненіе лучей, они попадаютъ на болѣе отдаленное мѣсто стеклянной трубки, гдѣ приклеена третья дробинка и она тотчасъ падаетъ; наконецъ приближеніемъ магнита я сосредоточиваю нагрѣваніе на первой дробинкѣ, которая такъ же какъ и предыдущія отпадаетъ.

Этотъ опытъ показываетъ, что тепловыя свойства катодныхъ лучей остаются за ними и послѣ ихъ отклоненія магнитомъ и потому отдѣлить ихъ механическія свойства отъ тепловыхъ посредствомъ магнита намъ не удается. Да такъ это и должно быть по гипотезѣ Крукса; вѣдь въ теплоту по Круксу превращается живая сила несущихся частицъ.

Подтвержденіе гипотезы Крукса.

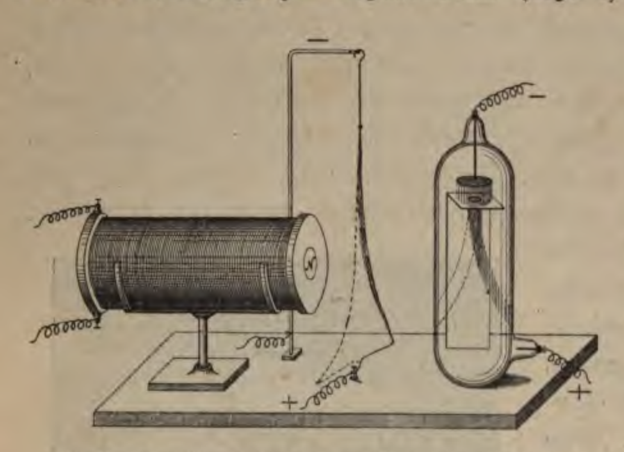
Гипотеза Крукса не была принята въ Европѣ отчасти потому, что не было дано убѣдительныхъ доказательствъ въ томъ, что она соотвѣтствуетъ дѣйствительности, отчасти потому, что гипотеза Крукса была гипотезою истеченія, а такая гипотеза уже разъ потерпѣла фіаско въ ученіи о свѣтѣ, хотя ее предложилъ геніальный Ньютонъ; главнымъ же образомъ гипотеза Крукса не была принята потому, что слѣдствія изъ нея вытекающія долго не удавалось подтвердить на опытѣ.

Первое, что бросается въ глаза въ гипотезѣ Крукса, это слѣдующее: если дѣйствительно катодные лучи суть потокъ отрицательнаго электричества, то они должны заряжать тѣло, на которое они падаютъ, отрицательнымъ электричествомъ.

Какъ просто можетъ показаться съ перваго взгляда реализовать такой опытъ, который прямо рѣшилъ бы этотъ вопросъ; дѣйствительно, стоитъ только поставить на пути катодныхъ лучей электроскопъ и все время пока онъ будетъ освѣщенъ катодными лучами, онъ долженъ все больше и больше заряжаться отрицательнымъ электричествомъ. Даже если бы зарядъ, несомый катодными лучами, былъ очень малъ, мы всегда могли бы подождать нѣкоторое время, пока на электроскопѣ накопится достаточное количество отрицательнаго электричества, чтобы произвести замѣтное отклоненіе его листочковъ.—Однако тутъ встрѣчаются серьезныя затрудненія, которыя не могъ преодолѣть даже такой геніальный экспериментаторъ какъ Герцъ. Дѣло въ томъ, что разрѣженный воздухъ, въ которомъ проходятъ катодные лучи, дѣлается проводникомъ электричества, и зарядъ, получаемый электроскопомъ отъ катодныхъ лучей, сейчасъ же теряется имъ, благодаря электропроводности воздуха. Этотъ новый фактъ былъ выясненъ гораздо позже работъ Герца, а потому и затрудненія, тут[ъ] возникшія, удалось устранить только недавно. Оказалось, что электропро[вод]ность воздуха тѣмъ меньше, чѣмъ онъ рѣже, поэтому для удачи о[пыта]

лучей на небольшой поверхности; это всегда и дѣлается въ новѣйшихъ трубкахъ Рентгена (см. чер. 2).

Однако особенно любопытныя свойства катодныхъ лучей наблюдаются при приближеніи къ нимъ магнита. Оказывается, что магнитъ дѣйствуетъ на нихъ; но онъ ихъ не притягиваетъ и не отталкиваетъ, а отклоняетъ въ сторону.—Передъ вами (чер. 7) помѣщена трубка съ вертикальнымъ люминисцирующимъ экраномъ, на которомъ можно прослѣдить весь путь катоднаго луча, идущаго вертикально, сверху внизъ. Если я приближу къ трубкѣ магнитъ или электромагнитъ, то сѣверный полюсъ отклонитъ катодный лучъ влѣво отъ себя. Одновременно съ трубкою я помѣщаю передъ магнитомъ легко подвижную проволоку, сдѣланную изъ мишурныхъ нитокъ, по которой идетъ электрическій токъ, причемъ отрицательное электричество, какъ и въ трубкѣ, идетъ сверху внизъ. Вы видите, что эта проволока отклоняется магнитомъ совершенно также, какъ и катодный лучъ, и вообще, въ какія бы положенія мы ни ставили катодный лучъ и этотъ подвижной токъ по отношенію къ магниту, ихъ отклоненія будутъ всегда одинаковы. Вблизи сильнаго электромагнита мишурная проволока обовьется вокругъ него спиралью—катодный лучъ тоже закрутится въ ту же сторону и такъ сильно, что можетъ описавъ дугу опять возвратиться въ катоду.



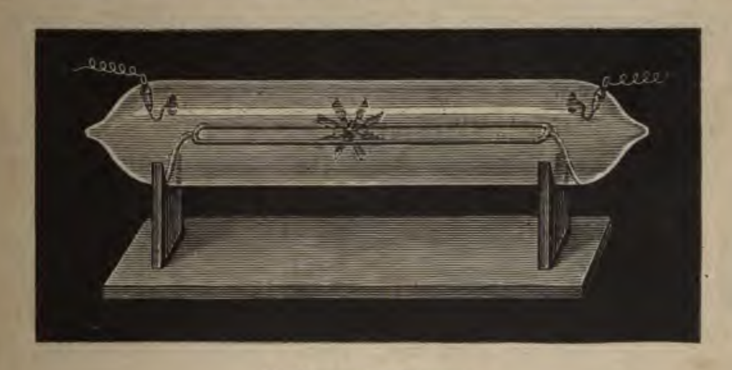
7. Отклоненіе катодныхъ лучей и электрическаго тока магнитомъ.

Это явленіе открытое Плюккеромъ и изученное Круксомъ въ высшей степени оригинальное; мы не знаемъ ни одного луча, кромѣ катоднаго, который бы отклонялся магнитомъ; ни въ свѣтовыхъ ни въ ультра-красныхъ, ни въ ультра-фіолетовыхъ лучахъ, ни въ лучахъ Рентгена до сихъ поръ не удалось получить хотя бы едва замѣтнаго отклоненія самыми сильными магнитами. Болѣе того, если бы даже удалось получить это отклоненіе, то современная теорія свѣта не въ состояніи была бы его объяснить. Поэтому мы должны заключить, что катодные лучи коренными образомъ отличаются отъ всѣхъ извѣстныхъ намъ лучей, они не представляютъ волнообразнаго движенія эфира, а скорѣе походятъ на потокъ *отрицательнаго электричества.*

Такую именно гипотезу катодныхъ лучей и предложилъ Круксъ.

Однако между потокомъ отрицательнаго электричества и катодными
чами есть и существенная разница. Отрицательное электричество те-
тъ отъ кадота къ аноду, между тѣмъ какъ катодные лучи распростра-
ются прямолинейно и нормально къ катоду, совершенно независимо
ь положенія анода въ трубкѣ. Для объясненія этого, Круксъ долженъ
лъ предположить, что лучи эти имѣютъ своего рода инерцію, т. е.
едположить, что они состоятъ изъ очень мелкихъ частицъ матеріи, за-
женныхъ отрицательнымъ электричествомъ и несущихся съ громадною
ростью по инерціи прямолинейно. Тамъ, гдѣ эти частицы ударяются
стекло или другое какое-либо вещество, поставленное на ихъ пути,
и превращаютъ живую силу своего движенія въ теплоту, свѣтъ или
чи Рентгена.

Чтобы показать, что живая сила этихъ частицъ способна произво-
ть и механическое дѣйствіе, Круксъ придумалъ цѣлый рядъ прибо-
въ, одинъ изъ которыхъ вы видите теперь на экранѣ (чер. 8).



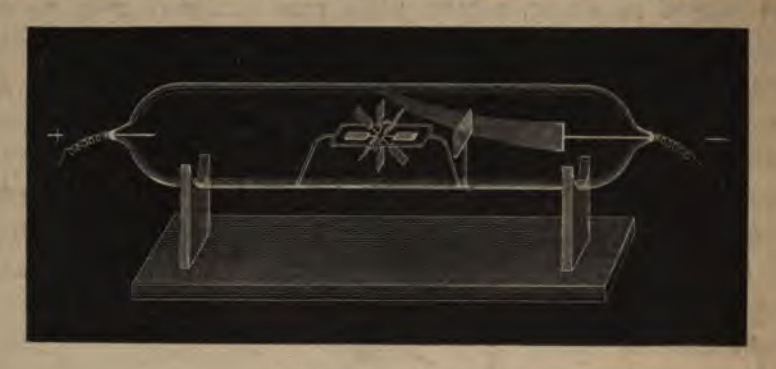
8. Колесико Крукса.

о—колесико съ слюдяными или алюминіевыми лопастями, способное
титься по двумъ стекляннымъ палочкамъ, какъ по рельсамъ. Пустимъ
него слѣва катодные лучи;—вы видите оно покатилось направо; пере-
нимъ направленіе тока въ трубкѣ и колесико, остановившись на мгно-
віе, быстро покатилось въ обратную сторону.

Что движеніе колесика происходитъ дѣйствительно подъ дѣйствіемъ
тодныхъ лучей, а не отъ какихъ-нибудь другихъ причинъ или явленій,
оисходящихъ внутри трубки, можно показать приблизивъ къ трубкѣ
гнитъ. Магнитомъ можно отклонить катодные лучи настолько, что они
будутъ попадать на колесико, и послѣднее останется въ покоѣ.

Еще лучше это можно показать въ слѣдующей трубкѣ (чер. № 9),
ѣ *на горизонтальной* неподвижной оси помѣщено такое же колесико съ
астями, но такъ, что катодные лучи не попадаютъ на него непосред-
нно, а задерживаются небольшой стеклянной пластинкой. При пр

пусканіи тока черезъ эту трубку, колесико остается неподвижнымъ, но если поднести къ трубкѣ сѣверный или южный полюсъ магнита, то лучи



9. Мельница Крукса.

отклонятся и будутъ ударять въ верхнія или нижнія лопасти мельницы, и она начнетъ вращаться влѣво или вправо.

Не нужно однако думать, что эти опыты доказываютъ матеріальность катодныхъ лучей. Очень можетъ быть, что вращеніе тутъ происходитъ отъ нагрѣванія самого колесика катодными лучами и расширенія и движенія воздуха у нагрѣтаго мѣста. Самъ же Круксъ показалъ намъ цѣлый рядъ радіометровъ, т. е. такихъ же колесиковъ съ лопастями, движущихся отъ дѣйствія лучей свѣта и теплоты; а про эти лучи мы давно знаемъ, что они не несутъ съ собою матеріальныхъ частицъ. Вы видите теперь въ проекціи такой радіометръ Крукса (чер. № 10) и замѣтьте, какъ быстро онъ вращается подъ дѣйствіемъ лучей проекціоннаго фонаря.



10. Радіометръ Крукса.

Мы уже раньше замѣтили, что катодные лучи производятъ нагрѣваніе и даже весьма значительное, такъ какъ платина накалялась добѣла, теперь же я могу показать, что эти свойства катодныхъ лучей сохраняются ими и послѣ ихъ отклоненія магнитомъ.

Въ этой трубкѣ (чер. № 11) катодные лучи идутъ вдоль нея, слѣва направо и не попадаютъ на ея боковыя стѣнки; къ стѣнкамъ же съ нижней стороны прилѣплены воскомъ три небольшихъ дробинки. Приближеніемъ магнита я могу направить катодные лучи въ любое мѣсто трубки, напримѣръ, туда, гдѣ приклеена средняя дробинка. Вы видите, воскъ таетъ въ нѣсколько секундъ и дробинка падаетъ. Удаливъ



11. Нагрѣваніе катодными лучами.

немного магнитъ, я получаю менѣе сильное отклоненіе лучей, они попадаютъ на болѣе отдаленное мѣсто стеклянной трубки, гдѣ приклеена третья дробинка и она тотчасъ падаетъ; наконецъ приближеніемъ магнита я сосредоточиваю нагрѣваніе на первой дробинкѣ, которая такъ же какъ и предыдущія отпадаетъ.

Этотъ опытъ показываетъ, что тепловыя свойства катодныхъ лучей остаются за ними и послѣ ихъ отклоненія магнитомъ и потому отдѣлить ихъ механическія свойства отъ тепловыхъ посредствомъ магнита намъ не удается. Да такъ это и должно быть по гипотезѣ Крукса; вѣдь въ теплоту по Круксу превращается живая сила несущихся частицъ.

Подтвержденіе гипотезы Крукса.

Гипотеза Крукса не была принята въ Европѣ отчасти потому, что не было дано убѣдительныхъ доказательствъ въ томъ, что она соотвѣтствуетъ дѣйствительности, отчасти потому, что гипотеза Крукса была гипотезою истеченія, а такая гипотеза уже разъ потерпѣла фіаско въ ученіи о свѣтѣ, хотя ее предложилъ геніальный Ньютонъ; главнымъ же образомъ гипотеза Крукса не была принята потому, что слѣдствія изъ нея вытекающія долго не удавалось подтвердить на опытѣ.

Первое, что бросается въ глаза въ гипотезѣ Крукса, это слѣдующее: если дѣйствительно катодные лучи суть потокъ отрицательнаго электричества, то они должны заряжать тѣло, на которое они падаютъ, отрицательнымъ электричествомъ.

Какъ просто можетъ показаться съ перваго взгляда реализовать такой опытъ, который прямо рѣшилъ бы этотъ вопросъ; дѣйствительно, стоитъ только поставить на пути катодныхъ лучей электроскопъ и все время пока онъ будетъ освѣщенъ катодными лучами, онъ долженъ все больше и больше заряжаться отрицательнымъ электричествомъ. Даже если бы зарядъ, несомый катодными лучами, былъ очень малъ, мы всегда могли бы подождать нѣкоторое время, пока на электроскопѣ накопится достаточное количество отрицательнаго электричества, чтобы произвести замѣтное отклоненіе его листочковъ.—Однако тутъ встрѣчаются серьезныя затрудненія, которыя не могъ преодолѣть даже такой геніальный экспериментаторъ какъ Герцъ. Дѣло въ томъ, что разрѣженный воздухъ, въ которомъ проходятъ катодные лучи, дѣлается проводникомъ электричества, и зарядъ, получаемый электроскопомъ отъ катодныхъ лучей, сейчасъ же теряется имъ, благодаря электропроводности воздуха. Этотъ новый фактъ былъ выясненъ *гораздо позже* работъ Герца, а потому и затрудненія, тут *возникшія, удалось* устранить только недавно. Оказалось, что электропроводность воздуха тѣмъ меньше, чѣмъ онъ рѣже, поэтому для удачи о

тѣни съ размытыми контурами. Ленаръ сравниваетъ ихъ съ распространеніемъ свѣта въ мутной водѣ или даже въ молокѣ.

Какъ же малы должны быть частички матеріи, изъ которыхъ состоятъ по Круксу катодные лучи, если даже такая прозрачная среда, какъ разрѣженный газъ, представляется для нихъ уже мутною. Очевидно онѣ должны быть даже меньше самой малой изъ извѣстныхъ намъ частицъ газа—меньше частицы водорода!

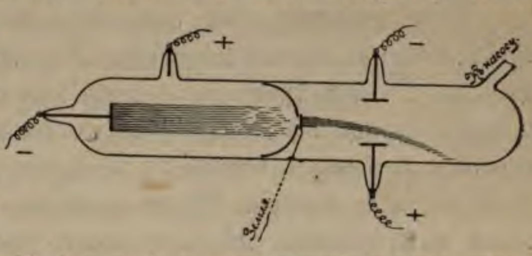
Еще раньше Ленара Гольдштейнъ обратилъ вниманіе на то, что катодные лучи отражаются отъ полированныхъ поверхностей диффузно, т. е. даже самая тщательная политура представляется для катодныхъ частичекъ шереховатой.

Отклоненіе катоднаго луча магнитомъ было впрочемъ совершенно одинаково въ какой бы средѣ онъ ни распространялся. Точно также и зарядъ несомый имъ не измѣнялся отъ присутствія того или иного газа въ трубкѣ, а при крайнемъ разрѣженіи было еще легче констатировать этотъ зарядъ электроскопомъ, потому что явленіе не осложнялось электропроводностью газа.

Обратите вниманіе на то, что Круксовы частицы, прежде чѣмъ дойти до проволоки, соединенной съ электроскопомъ, должны были пройти черезъ алюминіево окошечко. Алюминій, какъ извѣстно, проводникъ электричества; отчего же эти частицы не отдали своего заряда алюминіевому листку въ окошечкѣ?—Конечно эта отдача происходитъ и, если мы соединимъ алюминіевый листикъ особой проволокой съ землею, то электричество уйдетъ въ землю. Опыты Ленара показываютъ однако, что въ землю уйдетъ только часть электрическаго заряда катодныхъ лучей, другая часть пройдетъ черезъ окошко и зарядитъ электроскопъ. — Опять новое и неожиданное открытіе! При современномъ взглядѣ на электрическія явленія,—это фактъ совершенно необъяснимый. Какимъ образомъ электричество, встрѣчая на пути своемъ проводникъ, соединенный съ землею, можетъ тѣмъ не менѣе выйти снова изъ этого проводника въ пространство, лишенное воздуха и слѣдовательно совершенно не проводящее? Неужели же скорость Круксовыхъ частицъ такъ велика, что онѣ не успѣваютъ отдать свой зарядъ алюминію, проходя сквозь окошко?! Въ такомъ случаѣ скорость ихъ должна быть сравнима со скоростью распространенія электричества, со скоростью свѣта!

Непосредственное опредѣленіе этой скорости было сдѣлано различными способами Томсономъ, Бателли, Стефанини и Вихертомъ и измѣренія ихъ дали громадную скорость, около 100.000 километровъ въ секунду, и мы видимъ, что только что сдѣланное нами предположеніе дѣйствительно оправдывается на опытѣ, такъ какъ скорость свѣта равна *300.000 километровъ въ секунду*.

Теперь сдѣлаемъ еще одно важное слѣдствіе изъ гипотезы Крукса. сли катодные лучи заряжены отрицательно, то они не только должны клоняться магнитомъ какъ электрическій токъ, но и должны также притиваться положительнымъ электричествомъ и отталкиваться отрицательымъ. Во вторичной трубкѣ Ленара мы могли бы впаять двѣ пластинки ер. № 16) и, удаливъ изъ нея по возможности весь воздухъ, чтобы ѣлать ея содержимое хороимъ изоляторомъ, пустить меду этими пластинками катодй лучъ. Если пластинки бутъ заряжены противоположми электричествами, то нужно кидать, что катодный лучъ бутъ отклоненъ и притянутъ пожительно заряженной пластинй. Это слѣдствіе дѣйствительно подтвердили на опытѣ почти одновренно слѣдующіе ученые: В. Кауфманъ въ Берлинѣ, Дж. Томсонъ въ Лоннѣ, В. Винъ въ Ахенѣ, Ленаръ въ Боннѣ. Одна и та же мысль, почти инаковая постановка опыта, явились одновременно у различныхъ учехъ въ различныхъ странахъ — явленіе далеко не рѣдко встрѣчающееся исторіи научныхъ открытій. Очевидно это вліяніе духа времени.



16. Отклоненіе катодныхъ лучей въ электростатическомъ полѣ.

Тѣми же учеными были произведены и количественныя измѣренія дъ катодными лучами *).

*) Постараемся хотя вкратцѣ познакомиться съ ихъ вычисленіями. Представимъ себѣ катодныя частицы съ массою m и электрическимъ зарядомъ e несутся со скоростью v ударяясь о пластинку, поставленную на пути ихъ, отдаютъ ей всю свою живую силу $\frac{mv^2}{2}$ видѣ тепла и весь свой зарядъ e. Измѣряя одновременно и то и другое: первое термогромъ, второе электрометромъ, мы можемъ получить отношеніе $\frac{mv^2}{2.e} = a$.

Наши частицы представляютъ изъ себя потокъ отрицательнаго электричества $v.e$, на коый магнитное поле, имѣющее напряженіе H, дѣйствуетъ съ силою $H.v.e.$, сообщая частиъ ускореніе $\frac{H.v.e}{m}$, направленное все время перпендикулярно къ ихъ движенію.—Изъ меники мы знаемъ, что при такихъ условіяхъ частицы будутъ двигаться по кругу и сила Hve буъ центростремительная сила, равная $\frac{mv^2}{R}$, гдѣ—R радіусъ этого круга. Слѣдовательно

$$e = \frac{mv^2}{R} \text{ и } R = \frac{H.e}{m.v}.$$

Наконецъ мы можемъ сдѣлать еще измѣренія и въ электростатическомъ полѣ, гдѣ одный лучъ тоже изогнется, но здѣсь отклоняющая сила не перпендикулярна къ напранію движенія, а всегда направлена въ сторону положительно заряженной пластинки. Жеузнать насколько отклонится катодный лучъ въ электростатическомъ полѣ, мы должны шить *совершенно такую же* задачу, какую рѣшаютъ артиллеристы, желающіе знать наько *отклонится горизонтально* летящая пуля отъ дѣйствія земного притяженія.

Изъ такихъ измѣреній, сдѣланныхъ при самыхъ разнообразныхъ условіяхъ, оказалось возможнымъ, основываясь на гипотезѣ Крукса, вычислить скорость катодныхъ лучей, которая получилась приблизительно въ три раза меньше скорости свѣта, т. е. равная 100.000 километровъ въ секунду;—результатъ, какъ мы видимъ, получился тотъ же, что и при непосредственныхъ измѣреніяхъ Вихерта.

Если вспомнить, что скорость пули доходитъ до 1 километра въ секунду, скорость движенія молекулъ, по кинетической теоріи газовъ, доходитъ до 2 километровъ въ секунду, наконецъ скорость движенія земли вокругъ солнца 30 километровъ въ секунду, то мы увидимъ насколько скорость катодныхъ частичекъ превосходитъ всѣ до сихъ поръ изученныя нами движенія матеріи. Мы ни разу еще не наблюдали въ природѣ движеніе матеріальныхъ массъ съ такою громадною скоростью.

Кромѣ вычисленія скорости движенія катодныхъ частицъ, изъ измѣреній произведенныхъ тѣми же учеными, можно вычислить сколько электричества несетъ съ собою каждый граммъ катоднаго вещества, т. е. другими словами, опредѣлить отношеніе заряда катодныхъ частицъ къ ихъ массѣ. Оказалось, что это отношеніе равно 10.000.000. Число это очень большое и указываетъ намъ, что или зарядъ каждой катодной частицы очень великъ, или самыя частицы очень малы.

Гипотеза о первичной матеріи.

Надобно замѣтить, что представленіе о частицахъ, заряженныхъ электричествомъ, не есть что-либо новое въ наукѣ. Оно уже встрѣчается при объясненіи явленія разложенія воды электрическимъ токомъ. По нашимъ воззрѣніямъ, во время такого разложенія или электролиза, водородъ, заряженный положительнымъ электричествомъ, идетъ въ одну сторону, а отрицательно заряженный кислородъ—въ другую. Здѣсь мы тоже можемъ

Въ нѣкоторое время t пули пролетитъ горизонтальное разстояніе $l = v.t$, а отъ дѣйствія тяжести опустится внизъ на $h = \frac{gt^2}{2}$ или, такъ какъ $t = \frac{l}{v}$, на величину $h = g\,\frac{l^2}{2v^2}$.

Для случая катодныхъ частицъ въ электростатическомъ полѣ напряженія H^1, сила на нихъ дѣйствующая будетъ $H.^1e$ и ускореніе $\frac{H.^1e}{m}$. Эту-то величину намъ и нужно подставить вмѣсто g, и тогда будемъ имѣть отклоненіе катоднаго луча $h = H^1.\,\frac{e}{m}.\,\frac{l^1}{2v^2}$.

Мы имѣемъ теперь три уравненія, въ которыхъ всѣ величины могутъ быть непосредственно измѣрены кромѣ e, m и v. Любыя два изъ этихъ уравненій даютъ намъ возможность опредѣлить двѣ величины, а именно скорость катодныхъ лучей v и отношеніе ихъ заряда къ ихъ массѣ $\frac{e}{m}$. Третье уравненіе можетъ служить для провѣрки.

измѣрить скорость движенія частицъ и количество электричества, несомое опредѣленнымъ количествомъ водорода или кислорода. Но здѣсь у насъ получатся величины совершенно другого порядка. Скорость движенія водорода напримѣръ, который движется быстрѣе другихъ тѣлъ, окажется всего нѣсколько сантиметровъ въ часъ, а отношеніе заряда къ его массѣ равно 10000.

По закону Фарадея электрическій зарядъ, несомый любымъ атомомъ какого угодно вещества, получаемаго электролизомъ одинаковъ, а потому отношеніе заряда къ массѣ каждаго атома будетъ обратно пропорціонально атомному вѣсу. Если распространить этотъ законъ и на катодныя частицы, для которыхъ отношеніе заряда къ массѣ въ 1000 разъ больше, чѣмъ для водорода, то масса этой частицы окажется въ 1000 разъ меньше массы водорода! Въ такомъ случаѣ становится понятнымъ, почему катодные лучи распространяются въ водородѣ диффузно, какъ это показали опыты Ленара, о которыхъ мы говорили раньше; для такихъ маленькихъ частичекъ прозрачный и легкій газъ—водородъ дѣйствительно можетъ представить мутную среду въ родѣ молока для обыкновеннаго свѣта.

Весь механизмъ разсматриваемыхъ нами явленій, катодныхъ лучей съ одной стороны и электролиза съ другой,—будетъ намъ еще яснѣе, если мы сдѣлаемъ слѣдующее сравненіе.

Представимъ себѣ, на днѣ глубокой рѣки пробивается ключевая вода. Такой подводный ключъ, встрѣчая на дальнѣйшемъ пути своемъ массу текучей воды и сильное треніе, теряетъ тотчасъ же всю свою живую силу и покоряется общему теченію рѣки. Но пусть только рѣка обмелѣетъ—ключъ вырвется наружу и будетъ бить фонтаномъ. Точно также и наэлектризованныя частицы при электролизѣ воды встрѣчаютъ въ жидкости такое сопротивленіе своему движенію, что могутъ двигаться лишь черепашьимъ шагомъ и именно туда, куда ихъ направляютъ электрическія силы; и если эти частицы наэлектризованы отрицательно, — отъ катода къ аноду. Другое дѣло въ сильно разрѣженномъ газѣ, тамъ онѣ свободны въ своемъ движеніи и могутъ бить фонтаномъ катодныхъ лучей

Спрашивается, однако, имѣемъ ли мы право сравнивать явленія происходящія въ Круксовой трубкѣ съ явленіемъ электролиза жидкостей? Въ жидкостяхъ намъ, напримѣръ, извѣстно, что одновременно съ движеніемъ отрицательно заряженныхъ частицъ въ одну сторону, имѣется и движеніе положительно наэлектризованныхъ частицъ въ сторону обратную. Между тѣмъ въ нашемъ очеркѣ мы все время говоримъ о катодныхъ частицахъ и совершенно умалчиваемъ о томъ, существуютъ ли частицы *анодныя.*—Это мы дѣлаемъ только потому, что анодныя частицы *еще очень мало* изслѣдованы, но тѣмъ не менѣе существованіе ихъ обн*ружено прекраснымъ* изслѣдованіемъ Вина въ Ахенѣ.

Уже давно Гольдштейномъ было замѣчено, что, если сдѣлать катодную пластинку съ отверстіями, то изъ этихъ отверстій въ сторону, обратную катоднымъ лучамъ, выходятъ какіе-то новые лучи красноватаго цвѣта. Въ самое послѣднее время Винъ, показалъ, что лучи эти обладаютъ всѣми свойствами, какими должны были бы обладать лучи анодные: они несутъ съ собою положительный зарядъ, они отклоняются магнитомъ такъ же, какъ потокъ положительнаго электричества, они притягиваются отрицательно заряженнымъ тѣломъ. Вину удалось смѣрить и скорость ихъ, оказавшуюся равною 360 километровъ въ секунду, и опредѣлить отношеніе ихъ заряда къ ихъ массѣ, которое близко подходитъ къ этой же величинѣ полученной для водорода. Дѣйствительно ли здѣсь получается водородъ или какое-либо другое вещество и почему анодные лучи обнаруживаются только у обратной стороны катода, тогда какъ ихъ появленіе слѣдовало бы ожидать скорѣе всего у анода—это все еще вопросы далеко не выясненные и мы не можемъ на нихъ останавливаться. Во всякомъ случаѣ, какъ предполагаетъ и самъ Винъ, аналогію между электролизомъ въ жидкостяхъ и прохожденіемъ электричества черезъ газы нужно считать весьма естественной.

Переходя снова къ болѣе изученнымъ явленіямъ катодныхъ лучей, мы особенно должны подчеркнуть то замѣчательное обстоятельство, что величина отношенія заряда къ массѣ катодныхъ лучей совершенно не зависитъ ни отъ формы и величины трубки, ни отъ того или другого газа, наполняющаго трубку, ни отъ давленія этого газа, ни отъ вещества катода или анода. Слѣдовательно катодные частички содержатся во всѣхъ тѣлахъ и вездѣ однѣ и тѣ же. Что же это за вещество, которое входитъ въ составъ всѣхъ тѣлъ природы, которое въ 1000 разъ легче водорода? Я думаю, что послѣ всего того, что мы узнали сегодня, вы сами могли бы отвѣтить на этотъ вопросъ. Однако предоставимъ слово самому основателю гипотезы о катодныхъ частицахъ, самому Круксу.

Вотъ что говорилъ Круксъ 40 лѣтъ тому назадъ, называвшій катодные лучи четвертымъ или лучистымъ состояніемъ матеріи:

«Изучая четвертое—лучистое состояніе матеріи, мы, какъ мнѣ кажется, имѣемъ подъ руками и въ сферѣ нашихъ изслѣдованій тѣ первичные атомы матеріи, изъ которыхъ, какъ вполнѣ основательно предполагаютъ, состоятъ всѣ тѣла природы. Мы видимъ, что лучистая матерія, по однимъ своимъ свойствамъ такъ же матеріальна, какъ вотъ этотъ столъ,—по другимъ—она скорѣе походитъ на лучистую энергію. Мы дѣйствительно коснулись той пограничной области, гдѣ матерія и энергія переходятъ одна въ другую. Я думаю, что величайшія задачи будущаго найдутъ *именно въ этой пограничной* области свое разрѣшеніе; болѣе того, здѣсь, *какъ мнѣ кажется*, лежитъ граница всего реальнаго міра»!

Не звучатъ ли эти слова какъ пророчество?

Во всякомъ случаѣ несомнѣнно,—они вылились въ минуту высокаго подъема духа, въ минуту вдохновенія.... Тогда эти слова, впрочемъ, не могли имѣть большого значенія:—еще слишкомъ мало было опытнаго матеріала. Теперь же, когда полученныя измѣреніемъ цифры заставляютъ во всякомъ тѣлѣ предполагать существованіе частичекъ гораздо меньшихъ, чѣмъ частицы водорода, причемъ свойства этихъ частичекъ оказываются одинаковыми, изъ какого бы тѣла онѣ не происходили, невольно является мысль—не правъ ли Круксъ, не есть ли это первичная матерія? Если бы это оказалось такъ, то было бы въ высшей степени важно какъ для науки, такъ и для техники получить это вещество. Вѣдь изъ первичной матеріи можно было бы дѣлать, что угодно—золото, драгоцѣнные камни! У насъ подъ рукою былъ бы тотъ философскій камень, котораго такъ тщетно старались добыть алхимики! Но времена алхимиковъ давно прошли и современные ученые смотрятъ на философскій камень, съ болѣе философской точки зрѣнія. Не камней драгоцѣнныхъ нужно имъ добыть, а прежде всего—добыть еще болѣе драгоцѣнную истину; «прочее все приложится намъ».

Сдѣлаемъ же небольшой подсчетъ, сколько этой первичной матеріи мы могли бы получить въ Круксовой трубкѣ?

Передъ вами виситъ въ аудиторіи цѣлый рядъ 16-ти свѣчныхъ лампочекъ накаливанія. Черезъ каждую изъ нихъ идетъ электрическій токъ въ полъ-Ампера. Если взять лампочку побольше, то будемъ имѣть токъ въ цѣлый Амперъ. Такой силы токъ, пропущенный черезъ растворъ, напримѣръ, уксуснокислаго свинца разложитъ его и выдѣлитъ намъ одинъ граммъ свинца въ четверть часа. Желая выдѣлить одинъ граммъ мѣди изъ раствора мѣднаго купороса, мы должны бы были пропускать тотъ же токъ цѣлый часъ, потому что атомный вѣсъ мѣди приблизительно раза въ четыре меньше атомнаго вѣса свинца. Для выдѣленія одного грамма водорода, пришлось бы подождать цѣлые сутки.

Катодное вещество, какъ мы видѣли, 1000 разъ легче водорода; получить одинъ граммъ его токомъ въ одинъ Амперъ мы можемъ только черезъ 1000 сутокъ, т.-е. черезъ 3 года! Но это еще не все. У насъ нѣтъ такихъ Круксовыхъ трубокъ, черезъ которыя могъ бы проходить токъ въ одинъ Амперъ; сопротивленіе этихъ трубокъ благодаря выкачанному воздуху слишкомъ велико, такъ что, даже при такихъ высокихъ напряженіяхъ, которыя даетъ намъ спираль Румкорфа, мы получаемъ токъ всего въ одну тысячную Ампера. А въ такомъ случаѣ выдѣленіе одного грамма *первичнаго вещества* заставило бы ждать себя три тысячи лѣтъ!

Результатъ, *какъ* видите, не особенно утѣшительный. Однако не *демъ отчаяваться*.

«Когда идешь въ гору», говорится въ швейцарскомъ путеводителѣ Бедекера, «то не смотри на то, сколько тебѣ еще осталось, а лучше на то, сколько ты уже прошелъ».

Наука наша несомнѣнно «идетъ въ гору», вершина которой всегда будетъ на недосягаемой высотѣ. Мы дошли съ вами теперь до труднаго мѣста. Пора и оглянуться назадъ.

Вспомнимъ то время, когда Рентгенъ впервые обнародовалъ свое открытіе; съ какимъ трудомъ тогда другіе ученые повторяли его опыты. Чтобы сдѣлать слабый снимокъ съ руки, требовалось цѣлыхъ пять или даже десяти минутъ времени, для различенія тѣни на экранѣ нужно было совсѣмъ близко подходить къ трубкѣ. Что же мы видимъ теперь? Теперь аппараты Рентгена уставлены почти во всѣхъ клиникахъ, снимки дѣлаются почти моментально и не только съ рукъ или ногъ, но и со всего человѣческаго туловища; свѣченіе экрана видно цѣлой аудиторіи. Самому Рентгену удалось даже сдѣлать фотографическій снимокъ съ свинцовой пули, лежащей въ заряженномъ ружьѣ. Успѣхи достигнутые въ этой области за какихъ-нибудь два, три года такъ обширны, что служать содержаніемъ спеціальнаго журнала.

То, что прежде удавалось съ трудомъ,—стало такимъ легкимъ. То, что было выше нашихъ силъ — стало намъ по силамъ. Не въ правѣ ли мы ожидать такихъ же блестящихъ результатовъ въ недалекомъ будущемъ и для катодныхъ лучей?

Однако пойдемъ далѣе.

Лучи Беккереля. Радій и Полоній.

Вскорѣ послѣ открытія Рентгена, Беккерель въ Парижѣ сдѣлалъ еще другое важное открытіе. Онъ замѣтилъ, что соли металла урана и въ особенности самъ уранъ испускаетъ изъ себя лучи Рентгена и безъ того, чтобы на него дѣйствовали катодные лучи. Для этого даже не оказалось необходимымъ дѣйствіе свѣта, какъ это можно было бы ожидать по аналогіи съ явленіемъ фосфоресценціи. Кусочекъ урана, лежавшій въ совершенной темнотѣ даже нѣсколько мѣсяцевъ, продолжалъ испускать изъ себя невидимые лучи, своими свойствами напоминавшіе лучи Рентгена; они тоже проходили черезъ картонъ и аллюминій, тоже заставляли люминисцировать платино-синеродистую соль барія и также дѣйствовали на фотографическую пластинку. Уранъ сохранялъ это свойство испускать невидимые лучи даже и тогда, когда онъ пролежалъ въ совершенной темнотѣ три года.

После Беккереля и многіе другіе ученые стали изслѣдовать эти лучи и теперь имѣется уже вещество испускающее невидимые лучи, или, какъ теперь его называютъ, *радіоактивное* вещество, въ 70000 разъ сильнѣе урана.

Милостивыя государыни, я съ особеннымъ удовольствіемъ подчеркиваю то обстоятельство, что честь этого открытія принадлежитъ женщинѣ, а именно—г-жѣ Кюри. Вмѣстѣ со своимъ супругомъ, французскимъ физикомъ Кюри, она стала путемъ различныхъ химическихъ реакцій, дѣйствіемъ кислотъ, кристаллизаціей и т. п. выдѣлять все болѣе и болѣе радіоактивное вещество и результатомъ этихъ изысканій явилось не одно, а цѣлыхъ два новыхъ вещества, которыя были названы ею Радій и Полоній. *). Изслѣдованія эти представляютъ трудъ въ высшей степени кропотливый; чтобы получить какой-нибудь граммъ радія, нужно подвергнуть послѣдовательной обработкѣ 100000 граммовъ руды. Впрочемъ эти вещества до сихъ поръ еще не были получены въ чистомъ видѣ, они получаются лишь въ смѣси съ хлористымъ баріемъ. Самъ хлористый барій совершенно не радіоактивенъ, но можно получить смѣси его съ радіемъ, которыя будутъ имѣть различную активность. Опредѣляя изъ такихъ смѣсей атомный вѣсъ барія въ предположеніе, что въ нихъ нѣтъ ничего кромѣ хлора и барія г-жа С. Кюри получала различные результаты, чѣмъ активнѣе былъ изслѣдуемый препаратъ, тѣмъ больше оказывался атомный вѣсъ барія. Препаратъ радія, обладающаго радіоактивностъю въ 3000 разъ большею урана, далъ атомный вѣсъ барія 140; въ другомъ препаратѣ въ 7500 разъ активнѣе урана, атомный вѣсъ барія получился 145,8 и даже 174,1, тогда какъ на самомъ дѣлѣ слѣдовало бы для чистаго барія получить 138,1. Это указываетъ на то, что предположеніе о существованіи въ препаратѣ только хлора и барія невѣрно, и что тамъ находится какое-то другое и притомъ радіоактивное вещество—*радій*.

Если помѣстить препаратъ радія въ пламя, напримѣръ, горѣлки Бунзена, которое употребляютъ химики, то онъ издастъ такой же зеленоватый оттѣнокъ какъ и элементъ барій. Однако изслѣдуя этотъ свѣтъ спектроскопомъ, Демарсэ и Рунге нашли три новыхъ линіи въ спектрѣ радія, которыхъ нѣтъ въ хлористомъ баріи. Ясно, что здѣсь мы имѣемъ дѣло съ какимъ-то новымъ веществомъ, хотя до сихъ поръ и не удалось еще добыть его въ чистомъ видѣ.

Полоній тоже еще не полученъ отдѣльно. Мы знаемъ только, что лучи Полонія тоже невидимые, но отличаются отъ лучей радія. Достаточно указать на то, что хотя, по своимъ фотографическимъ дѣйствіямъ *и по своимъ дѣйствіямъ* на свѣтящійся экранъ изъ платино-баріе

*) *Г-жа Кюри полька*, урожденная Софья Складовска.

соли, полоніевы лучи гораздо сильнѣе радіевыхъ, тѣмъ не менѣе первые съ трудомъ проходятъ черезъ тонкія металлическія пластинки, тогда какъ лучи радія проходятъ сквозь свинецъ толщиною въ сантиметръ.

Для насъ, однако, въ настоящемъ очеркѣ въ особенности важно открытіе, сдѣланное надъ радіемъ Гизелемъ въ Брауншвейгѣ, которому удалось показать, что лучи радія отклоняются магнитомъ. Конечно, сейчасъ же возникло предположеніе, не имѣемъ ли мы здѣсь дѣло съ катодными лучами, и дѣйствительно, быстро другъ за другомъ появились работы Беккереля, С. Кюри и Гизеля доказавшія, что лучи радія обладаютъ всѣми свойствами катодныхъ лучей: они отклоняются магнитомъ въ ту же сторону, какъ и потокъ отрицательнаго элекричества, они притягиваются положительно наэлектизованнымъ тѣломъ и сами несутъ отрицательный зарядъ. Замѣчательно, что даже для отношенія заряда къ массѣ получилось то же самое число, что и для катодныхъ лучей въ Круксовой трубкѣ.

У меня здѣсь небольшое количество, всего одинъ граммъ радія, т. е. точнѣе говоря хлористаго барія съ примѣсью радія, выписаннаго мною отъ химической фабрики Де-Гаена въ Ганноверѣ. Это—бѣлый порошокъ, который слабо свѣтится въ темнотѣ; подъ вліяніемъ его лучей свѣтится Рентгеновскій экранъ и даже бумага, въ которую онъ завернутъ; лучи его отклоняются магнитомъ и т. д., но всѣ эти явленія не настолько сильны, чтобы ихъ можно было показывать цѣлой аудиторіи. Предполагая однако, что вамъ одного разсказа очевидца будетъ недостаточно, я произвелъ рядъ фотографическихъ снимковъ съ этимъ препаратомъ.

Первый снимокъ полученъ отъ крупинки радія, лежавшаго на серебрянномъ рублѣ, который въ свою очередь лежалъ на фотографической пластинкѣ завернутой въ два слоя черной бумаги. Экспозиція продолжалась 8 часовъ. Мы видимъ, что лучи радія прошли черезъ всю толщину серебрянаго рубля и черезъ бумагу. Если мы имѣемъ дѣло здѣсь съ катодными лучами, то они должны быть чрезвычайнно сильны, такъ какъ въ Круксовой трубкѣ катодные лучи черезъ серебро не проходятъ, или быть можетъ къ катоднымъ лучамъ радія примѣшаны еще какіе-либо другіе лучи.

На слѣдующихъ двухъ снимкахъ (чер. № 17 и 18) вы видите полюсы электромагнита, между которыми помѣщенъ препаратъ радія, завернутый въ бумагу. Лѣвый снимокъ представляетъ лучеиспусканіе радія, когда магниты еще не возбуждены; здѣсь свѣтъ почти равномѣрно распредѣленъ около полюсовъ, даже нижнія контуры ихъ вышли рѣзче верхнихъ. Правый снимокъ полученъ послѣ возбужденія магнитовъ, и мы видимъ здѣсь цѣлый снопъ свѣта, появившійся надъ полюсами, верхніе онтуры которыхъ теперь ярко очерчены. Лучи радія здѣсь отклонились

сверху, какъ и слѣдовало ожидать, такъ какъ лѣвый полюсъ магнита сѣверный. Но мы видимъ также, что не всѣ лучи отклонились одинаково, нѣкоторые изъ нихъ остались вовсе не отклоненными, такъ какъ и послѣ возбужденія электромагнита между полюсами его осталась часть



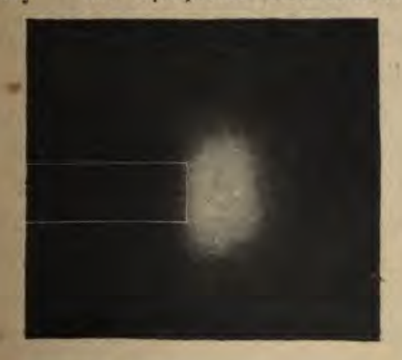
№ 17. Лучи радія.



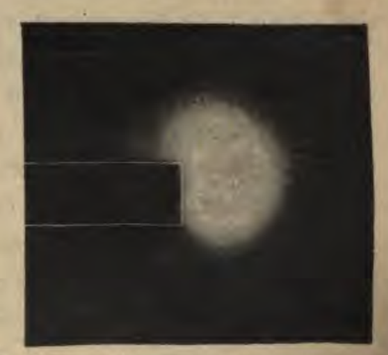
№ 18. Лучи радія отклоненные магнитомъ.

свѣта. Это обстоятельство тоже показываетъ, что радій испускаетъ изъ себя смѣсь лучей различной отклоняемости и вообще различныхъ свойствъ.

Слѣдующіе снимки (чер. № 19 и 20) представляетъ намъ ту же картину — въ профиль. Нѣсколько радіевыхъ крупинокъ завернуты въ



№ 19. Лучи радія.



№ 20. Лучи радія отклоненные магнитомъ.

свинцовую трубочку и даютъ на прилегающей къ этой трубочкѣ фотографической пластинкѣ размытый пучекъ лучей. Если возбудить теперь магнитное поле перпенкулярно къ пластинкѣ, то весь пучекъ лучей закручивается и, описавъ полную окружность приходитъ вновь къ

исходной точкѣ, къ отверстію свинцовой трубочки. Часть лучей и здѣсь остается не отклоненной.

Я не буду Васъ утомлять пересказомъ всего, что до сихъ поръ сдѣлано въ этой области, — изслѣдованія эти еще далеко не вполнѣ закончены,—а покажу еще одно любопытное явленіе. Я уже говорилъ ранѣе при описаніи опытовъ Ленара, что катодные лучи, распространяясь въ воздухѣ, дѣлаютъ его проводникомъ электричества. Тѣмъ же свойствомъ обладаютъ лучи Рентгена и Беккереля, и то же можно легко показать съ препаратомъ радія. Вы видите на экранѣ заряженный электроскопъ. Я приближаю къ нему радій и уже на разстояніи одного метра ясно замѣтно, какъ начинаютъ сближаться листочки электроскопа, т. е. онъ теряетъ свой зарядъ. Приближая препаратъ еще больше, мы быстро уничтожаемъ весь зарядъ электроскопа.

Сдѣлаемъ опытъ еще разъ и, зарядивъ электроскопъ, приближаемъ радій. Когда листочки электроскопа сошлись немного, удаляемъ препаратъ или закрываемъ его свинцовой пластинкой—тотчасъ листочки перестаютъ сходиться и останавливаются въ томъ положеніи, въ которомъ мы ихъ оставили; но стоитъ только дать снова лучамъ радія достигнуть электроскопа, какъ весь зарядъ его теряется.

Чтобы показать вамъ, что потеря заряда электроскопомъ дѣйствительно происходитъ отъ того, что воздухъ подъ дѣйствіемъ лучей радія становится проводникомъ элекричества, а не отъ посредственнаго дѣйствія радія на электроскопъ, я помѣщу препаратъ радія на такомъ разстояніи, напримѣръ въ полтора метра, чтобы его дѣйствіе на электроскопъ было незамѣтно. Теперь я осторожно сдуваю воздухъ, находящійся надъ препаратомъ радія, по направленію къ электроскопу и вы видите, что листочки тотчасъ же начинаютъ сходиться. Я перестаю дуть и, одновременно съ этимъ, прекращается дѣйствіе на электроскопъ.

Препаратъ радія, имѣющійся въ моемъ распоряженіи, еще не особенно сконцентрированъ; Гизелю удалось получить препараръ такой силы, что электроскопъ разряжается имъ на разстояніи пяти метровъ, а положенный въ желѣзный ящикъ со стѣнками въ палецъ толщиною, радій на разстояніи поль-метра уже оказываетъ замѣтное дѣйствіе на электроскопъ! И откуда же, подумаешь, исходитъ эта сила?! — Изъ щепотки какого-то бѣлаго порошка! Поневолѣ согласишься съ царемъ Берендеемъ: «полна чудесъ могучая природа!..

Недавно г-жа Кюри показала, что радій можетъ передавать свою чудо*дѣйственную силу и другимъ* тѣламъ посредствомъ лучеиспусканія или при*косновенія. Почти всѣ тѣла* подъ дѣйствіемъ радія начинаютъ тоже ис*пускать лучи Беккереля.* То же самое, какъ мы видѣли, наблюдается и ...дъ *катодными лучами;* попадая на стекло или въ особенности на пла

Интересно, что можно произвести и обратное превращеніе лучей Рентгена въ катодные лучи. Зарядивъ какое-нибудь тѣло отрицательнымъ электричествомъ, освѣтимъ его лучами Рентгена и Беккереля, и оно начнетъ терять свой зарядъ, т. е. испускать катодные лучи. Этотъ, опытъ можно также произвести и лучами свѣта, въ особенности фіолетовыми и ультра-фіолетовыми, которые имѣютъ свойство разряжать нѣкоторые тѣла, но непремѣнно заряженныя отрицательнымъ электричествомъ. Здѣсь тоже какъ разъ отрицательное электричество играетъ роль, а не положительное.

Ленаръ доказалъ на опытѣ, что получаемые подъ дѣйствіемъ свѣта съ отрицательно заряженныхъ тѣлъ катодные лучи обладаютъ всѣми свойствами обыкновенныхъ катодныхъ лучей получаемыхъ въ Круксовой трубкѣ.

Если зарядить отрицательнымъ элекричествомъ какое-либо раскаленное тѣло, то по наблюденіямъ Эльстера и Гейтеля оказывается, что оно тоже теряетъ свой зарядъ, слѣдовательно тоже испускаетъ катодные лучи.

И во всѣхъ выше перечисленныхъ случаяхъ отношеніе заряда несомаго лучами къ ихъ массѣ получается одинаковымъ.

Болѣе того, если мы представимъ себѣ всѣ тѣла природы состоящими изъ этого первичнаго катоднаго вещества, являющагося, какъ всегда, заряженнымъ отрицательнымъ электричествомъ, то мы должны предположить, что самый свѣтъ, испускаемый свѣтящимися тѣлами, происходитъ отъ колебательнаго движенія этихъ первичныхъ частичекъ, а въ такомъ случаѣ на колебанія этихъ частичекъ такъ же, какъ и на катодные лучи, долженъ дѣйствовать магнитъ. Какъ разъ три года тому назадъ такое явленіе было открыто голландскимъ ученымъ Земаномъ. Помѣстивъ между полюсами магнита святящееся пламя натрія, онъ могъ, при помощи сильнаго спектроскопа, наблюдать измѣненіе спектра, а именно—двоеніе натровыхъ линій и особое поляризованное состояніе лучей, исходящихъ изъ пламени, помѣщеннаго въ магнитномъ полѣ. Явленіе Земана не только было вполнѣ объяснено Лоренцомъ съ точки зрѣнія теоріи движущихся наэлектризованныхъ частицъ, но, что всего удивительнѣе, для отношенія заряда къ массѣ этихъ частицъ получилось то же самое число, что и для катодныхъ лучей.

Теорія катодныхъ частицъ начала понемногу проникать и въ другія родственныя съ физикою науки; такъ Арнстремъ предложилъ новую гипотезу солнечной короны, зодіакальнаго свѣта и сѣверныхъ сіяній, основанную на тѣхъ же катодныхъ частицахъ. Лоренцъ поднялъ вопросъ объ массѣ тѣлъ и о всемірномъ тяготѣніи—все съ точки зрѣнія движущихся наэлектризованныхъ частицъ и т. д. и т. д.

Мнѣ кажется, что всего сказаннаго достаточно, чтобы показать, что *гипотеза Крукса* о катодныхъ лучахъ, какъ о матеріальныхъ частичкахъ

первичнаго вещества, не только дѣлается все болѣе и болѣе вѣроятной, но и обѣщаетъ имѣть огромное вліяніе на наши современныя воззрѣнія въ физикѣ, химіи, астрономіи и механикѣ. Во всякомъ случаѣ, изслѣдованія, произведенныя за послѣдніе три года обогатили естествознаніе цѣлымъ рядомъ новыхъ, неожиданныхъ открытій, и мы можемъ съ радостью привѣтствовать зарю новой науки. Правда, утренній туманъ еще не совершенно разсѣялся, еще далеко не все выяснилось, но уже чувствуется бодрящее дыханіе свѣжей мысли, уже чувствуется приближеніе роскошнаго восхода свѣточа науки. — Трудно сказать, что дастъ намъ восходящій день, какіе перевороты произведутъ новѣйшія открытія и въ нашихъ научныхъ теоріяхъ и взглядахъ, въ нашей техникѣ и, наконецъ, въ нашей практической жизни. Вспомнимъ слова Архимеда, сказанныя имъ при взглядѣ на обыкновенный рычагъ: «Дайте мнѣ точку опоры, и я переверну весь міръ!» Между тѣмъ теперь этотъ рычагъ разроссся въ могущественную технику, и теперь мы уже знаемъ гдѣ та точка опоры, которую искалъ Архимедъ.—Эта точка опоры есть чистая наука!..

А. Эйхенвальдъ.

Москва.
Декабрь 1900 г.

Изъ № 3-го «Естествознаніе и Географія» за 1901 годъ.

Дозволено цензурою. Москва, 14 марта 1901 г.

Москва. Университетская типографія, Страстной бульв. 1901 г.

Отдѣльный оттискъ изъ Извѣстій Императорск.
Моск. Инж. Училища. Часть II, вып. II 1908 г.

О ДВИЖЕНІИ ЭНЕРГІИ

при полномъ внутреннемъ отраженіи свѣта.

А. А. Эйхенвальда.

1) Введеніе.

Послѣ классическихъ работъ Френеля [1]), который впервые истолковалъ значеніе мнимыхъ величинъ, получающихся въ формулахъ полнаго внутренняго отраженія свѣта, вопросъ этотъ подвергался многократной разработкѣ [2]). Особенный интересъ при этомъ представляетъ то свѣтовое явленіе, которое имѣетъ мѣсто во второй средѣ, т.-е. въ той—гдѣ обыкновенно бываетъ преломленный лучъ. По мнѣнію многихъ физиковъ, при полномъ внутреннемъ отраженіи, во второй средѣ получается особый лучъ, идущій вдоль плоскости раздѣла и отличающійся отъ обыкновенныхъ лучей тѣмъ, что амплитуда его непостоянная, а колебанія въ немъ продольныя.

Мы постараемся разъяснить это недоразумѣніе.

Для этого изслѣдуемъ во-первыхъ, какъ распредѣляются электрическія и магнитныя напряженія, т.-е. линіи силъ, на границѣ двухъ средъ, и во-вторыхъ, каковы направленія движенія свѣтовой энергіи при полномъ внутреннемъ отраженіи. Такъ какъ оба эти вопроса находятся въ тѣсной связи другъ съ другомъ, то мы и будемъ разсматривать ихъ одновременно.

Изслѣдованіе это показываетъ, что то, что многими авторами принимается за лучъ свѣта съ продольными колебаніями, распространяющійся вдоль плоскости раздѣла двухъ средъ, есть только проекція лучей на эту плоскость. На самомъ же дѣлѣ, при пол-

---

[1]) *Frésnel. Oeuvres.* I. p. 758 и слѣд.

[2]) Позднѣйшую литературу см. A. Winkelmann. *Handbuch der Physik.* VI 2 p. 1275. 1906 года, статьи P. Drude.

номъ внутреннемъ отраженіи лучи свѣта (т.-е. траекторіи энергіи) во второй средѣ, представляютъ собою кривыя линіи, направленіе коихъ мѣняется со временемъ; колебанія же свѣта этихъ лучей строго поперечны.

2) Общія уравненія.

Назовемъ черезъ E_x, E_y, E_z, M_x, M_y, M_z, проекціи напряженій электрическаго и магнитнаго поля на оси координатъ и черезъ ε μ діэлектрическую и діамагнитную постоянную данной среды; тогда уравненія Maxwell-Hertz'а для неподвижныхъ тѣлъ напишутся такъ [1]):

$$\frac{\varepsilon}{c}\frac{\partial E_x}{\partial t}=\frac{\partial M_z}{\partial y}-\frac{\partial M_y}{\partial z} \quad \ldots \ldots \ldots (1)$$

$$\frac{\varepsilon}{c}\frac{\partial E_y}{\partial t}=\frac{\partial M_x}{\partial z}-\frac{\partial M_z}{\partial x} \quad \ldots \ldots \ldots (2)$$

$$\frac{\varepsilon}{c}\frac{\partial E_z}{\partial t}=\frac{\partial M_y}{\partial x}-\frac{\partial M_x}{\partial y} \quad \ldots \ldots \ldots (3)$$

$$-\frac{\mu}{c}\frac{\partial M_x}{\partial t}=\frac{\partial E_z}{\partial y}-\frac{\partial E_y}{\partial z} \quad \ldots \ldots \ldots (4)$$

$$-\frac{\mu}{c}\frac{\partial M_y}{\partial t}=\frac{\partial E_x}{\partial z}-\frac{\partial E_z}{\partial x} \quad \ldots \ldots \ldots (5)$$

$$-\frac{\mu}{c}\frac{\partial M_z}{\partial t}=\frac{\partial E_y}{\partial x}-\frac{\partial E_x}{\partial y} \quad \ldots \ldots \ldots (6)$$

Плотность электромагнитной энергіи.

$$W=W_e+W_m=\frac{1}{8\pi}(\varepsilon E^2+\mu M^2) \quad \ldots \ldots \ldots (7)$$

Помножимъ уравненія (1), (2), (3) поочередно на E_x, E_y, E_z, а уравненія (4), (5), (6) соотвѣтственно на $-M_x$, $-M_y$, $-M_z$, и затѣмъ, помноживъ сумму всѣхъ этихъ уравненій на элементъ объема $d\tau$, проинтегрируемъ ее по нѣкоторому объему τ; тогда получимъ, принявъ во вниманіе (7)

$$\frac{\partial}{\partial t}\int W\,d\tau=-\int\left(\frac{\partial f_x}{\partial x}+\frac{\partial f_y}{\partial y}+\frac{\partial f_z}{\partial z}\right)d\tau$$

---

[1]) Оси координатъ выбраны, такъ что если ось $+X$ направлена на востокъ, ось $+Y$ на сѣверъ, то ось $+Z$ будетъ направлена въ зенитъ.

гдѣ

$$f_x = \frac{c}{4\pi} (E_y M_z - E_z M_y) \qquad (8)$$

$$f_y = \frac{c}{4\pi} (E_z M_x - E_x M_z) \qquad (9)$$

$$f_z = \frac{c}{4\pi} (E_x M_y - E_y M_x) \qquad (10)$$

Объемный интегралъ правой части нашего уравненія можно преобразовать въ интегралъ, распространенный по поверхности даннаго объема, и тогда

$$\frac{\partial}{\partial t}\int W.\ d\tau = -\int f_n.\ ds \qquad (11)$$

гдѣ f_n проекція вектора f на *наружную* нормаль къ элементу поверхности ds.

Уравненіе (11) выведено Pointing'омъ и истолковано имъ слѣдующимъ образомъ.

Пусть интегралъ (11) распространенъ по всему безконечному пространству, тогда въ безконечности, вдали отъ неэлектризованныхъ, немагниченныхъ и лучеиспускающихъ тѣлъ, E и M, а слѣдовательно и f равны нулю; поверхностный интегралъ правой части уравненія обращается въ нуль, и мы получаемъ выраженіе

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_0^\infty W.\ d\tau = 0$$

$$\int_0^\infty W.\ d\tau = Const.$$

которое означаетъ, что количество энергіи всего безконечнаго пространства не мѣняется со временемъ. Это есть не что иное, какъ законъ сохраненія энергіи.

Если же примѣнить уравненіе (11) къ конечному объему, то, вообще говоря, правая его часть не будетъ равна нулю, и электромагнитная энергія внутри даннаго объема будетъ мѣняться со временемъ. Предположимъ, что энергія внутри даннаго объема

увеличивается, тогда въ то же время гдѣ-нибудь снаружи количество энергіи должно на столько же уменьшиться, ибо общее количество энергіи мірового пространства должно оставаться постояннымъ. Уменьшеніе количества энергіи снаружи и увеличеніе его внутри разсматриваемаго объема мы можемъ представить себѣ происходящимъ вслѣдствіе *непрерывнаго* движенія энергіи снаружи внутрь объема, сквозь его поверхность. Назовемъ черезъ f *количество энергіи, протекающее въ единицу времени сквозь единицу поверхности, поставленной нормально къ движенію энергіи*, тогда правая часть уравненія (11) дастъ намъ полное количество энергіи, *втекающее* (знакъ минусъ означаетъ, что положительный потокъ энергіи направленъ противоположно *наружной* нормали) во всю поверхность даннаго объема въ единицу времени.

Итакъ, уравненіе Pointing'a (11) говоритъ, что увеличеніе или уменьшеніе количества энергіи внутри даннаго объема происходитъ вслѣдствіе втеканія или вытеканія энергіи сквозь поверхность, ограничивающую данный объемъ.

Выраженія (8), (9), (10) показываютъ, что плотность потока энергіи есть векторъ.

$$f = \frac{c}{4\pi} E.M.\sin(EM) \quad \text{. . . . . (12)}$$

и что f перпендикулярно къ E и къ M, причемъ относительное положеніе f, E и M такое же, какъ выбранное нами относительное положеніе осей $+X, +Y, +Z$ (см. стр. 16).

Какъ извѣстно, подъ лучемъ свѣта мы подразумѣваемъ ту линію (прямую, кривую или ломанную—безразлично), по которой энергія движется отъ свѣтящагося предмета къ освѣщенному. Слѣдовательно, *направленіе луча есть направленіе потока электромагнитной энергіи* и опредѣляется уравненіями (8), (9), (10) и (12); поэтому *лучъ свѣта всегда перпендикуляренъ къ электрическому и магнитному напряженію въ данной точкѣ.*

Этимъ опредѣленіемъ понятія „лучъ“ мы ниже воспользуемся.

3) Плоская волна.

Примѣнимъ теперь уравненія Maxwell'a къ частному случаю, когда лучъ свѣта направленъ параллельно плоскости ZX и когда въ направленіи, перпендикулярномъ къ этой плоскости, величины

E и M тѣже, что и въ плоскости ZX. Въ такомъ случаѣ, нужно вездѣ производныя по y положить равными нулю; тогда имѣемъ

$$\frac{\varepsilon}{c}\ \frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{\partial M_y}{\partial z} \quad \ldots\ldots (1) \qquad \frac{-\mu}{c}\ \frac{\partial M_x}{\partial t} = -\frac{\partial E_y}{\partial z} \quad \ldots (4)$$

$$\frac{\varepsilon}{c}\ \frac{\partial E_z}{\partial t} = +\frac{\partial M_y}{\partial x} \quad \ldots\ldots (2) \qquad \frac{-\mu}{c}\ \frac{\partial M_z}{\partial t} = +\frac{\partial E_y}{\partial x} \quad \ldots (5)$$

$$\frac{-\mu}{c}\ \frac{\partial M_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad . (3) \qquad \frac{\varepsilon}{c}\ \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial M_x}{\partial z} - \frac{\partial M_z}{\partial x} \quad . (6)$$

Мы видимъ, что въ данномъ случаѣ 6 уравненій распадаются на двѣ независимыя другъ отъ друга серіи.

Дѣйствительно, уравненія (1), (2), (3) содержатъ только величины E_x, E_z и M_y, т.-е. соотвѣтствуютъ лучу, въ которомъ плоскость электрическаго поля совпадаетъ съ плоскостью ZX; такой лучъ называется *лучемъ, поляризованнымъ перпендикулярно къ плоскости паденія.*

Уравненія (4), (5), (6), напротивъ того, упомянутыхъ выше величинъ не содержатъ, зато здѣсь имѣются M_x, M_z, E_y и потому эти уравненія соотвѣтствуютъ *лучу, поляризованному въ плоскости паденія.*

Оба эти луча, конечно, можно разсматривать независимо другъ отъ друга.

Зададимся слѣдующимъ рѣшеніемъ этихъ уравненій.

$$\left.\begin{aligned} E_x &= Ae^{i\alpha} \\ E_z &= Ce^{i\alpha} \\ M_y &= Me^{i\alpha} \end{aligned}\right\} \ldots\ldots\ldots (7) \qquad \left.\begin{aligned} M_x &= Le^{i\alpha} \\ M_z &= Ne^{i\alpha} \\ E_y &= Be^{i\alpha} \end{aligned}\right\} \ldots\ldots\ldots (8)$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{T}\,(t - ax - bz) \ldots\ldots\ldots (9)$$

$$i = \sqrt{-1}$$

Какъ извѣстно,

$$e^{i\alpha} = \cos\alpha + i\sin\alpha$$

и рѣшенія написаны нами въ мнимой формѣ лишь для удобства вычисленій; на самомъ же дѣлѣ уравненія эти удовлетворяются и функціями $\sin\alpha$ и $\cos\alpha$ въ отдѣльности. Послѣднія означаютъ,

что мы имѣемъ дѣло съ электромагнитными волнами періода T. Волны эти плоскія, такъ какъ въ любой плоскости

$$ax + bz = c$$

мы имѣемъ всюду одинаковыя фазы.

Двѣ параллельныя плоскости, для которыхъ $c_2 - c_1 = T$, имѣютъ согласно (9) разность фазъ 2π, т.-е. отстоятъ другъ отъ друга на длину волны $\lambda = vT$, гдѣ v — скорость распространенія волнъ.

Плоская волна, проходившая черезъ начало координатъ, при $t = 0$, будетъ имѣть во время T уравненіе

$$ax + bz = T$$

Съ другой стороны, если φ есть уголъ, составляемый нормалью къ плоскости съ осью Z, и если эта плоскость отошла отъ начала координатъ за время T на длину $\lambda = vT$, то ея уравненіе будетъ

$$\sin\varphi . x + \cos\varphi . z = \lambda = vT$$

Слѣдовательно,

$$a = \frac{\sin\varphi}{v}; \qquad b = \frac{\cos\varphi}{v} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (10)$$

Изъ этихъ выраженій мы видимъ, что v есть скорость распространенія фазъ, считаемая по нормали къ плоскости волнъ, тогда какъ $\frac{1}{a}$ и $\frac{1}{b}$ суть скорости распространенія фазъ соотвѣтственно по оси X и по оси Z.

Подставивъ (7), (8), (9) въ уравненія къ (1) — (6), мы получимъ слѣдующія соотношенія между амплитудами.

$$\frac{\varepsilon}{c} A = Mb \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (11) \qquad \frac{-\mu}{c} L = Bb \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (14)$$

$$\frac{\varepsilon}{c} C = - Ma \; . \; . \; . \; . \; . \; (12) \qquad \frac{-\mu}{c} N = - Ba \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (15)$$

$$\frac{\mu}{c} M = Ab - Ca \; . \; . \; . \; . \; (13) \qquad \frac{\varepsilon}{c} B = - Lb + Na \; . \; . \; . \; . \; (16)$$

Подставляя въ (13) и (16) значенія A, C, L и N изъ предыдущихъ уравненій и, имѣя въ виду (10), получаемъ и въ томъ и въ другомъ случаѣ

$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2} = a^2 + b^2 = \frac{1}{v^2} \quad \ldots \quad (17)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad \ldots \quad (18)$$

Это—извѣстный законъ Maxwell'а.

Остальныя уравненія даютъ намъ

$$C = -\frac{a}{b} A = -A tg\varphi \qquad L = -\frac{c}{\mu}.b.B = -\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\, B \cos\varphi$$

$$M = \frac{\varepsilon}{c}\,\frac{1}{b}\, A = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\,\frac{1}{\cos\varphi}\, A \qquad N = \frac{c}{\mu}\, a\, B = +\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\, B \sin\varphi$$

Послѣ чего, положивъ $A = E_p \cos\varphi$ и $B = E_s$, рѣшенія наши можно написать въ такомъ видѣ

$$E_x = +E_p \cos\varphi.\sin\alpha \qquad M_x = -\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\, E_s \cos\varphi.\sin\alpha$$

$$E_z = -E_p \sin\varphi\ \sin\alpha \qquad M_z = +\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\, E_s \sin\varphi\ \sin\alpha$$

$$M_y = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\ .\ E_p\ .\ \sin\alpha \qquad E_y = E_s$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{\sin\varphi.x + \cos\varphi.z}{v}\right); \qquad v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

Опредѣлимъ уголъ ψ между линіями силъ и осью Z

$$tg\ \psi_e = \frac{E_x}{E_z} = -\frac{1}{tg\ \varphi} \qquad tg\ \psi_m = \frac{M_x}{M_z} = -\frac{1}{tg\ \varphi}$$

слѣдовательно

$$\psi_e = \psi_m = \varphi + 90^0.$$

это значитъ, что линіи силъ перпендикулярны къ нормали волны, т.-е. лежатъ въ плоскости волны. Отсюда же слѣдуетъ, что направленіе потока энергіи, которое перпендикулярно къ E и M, совпадаетъ съ направленіемъ нормали къ плоскости волны.

4) Полное внутреннее отраженіе.

Рѣшеніе предыдущаго параграфа имѣетъ лишь тогда опредѣленный физическій смыслъ, когда

$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2} = a^2 + b^2 = \frac{1}{v^2} \qquad \ldots\ldots (1)$$

т.-е. когда a и b въ отдѣльности меньше $\frac{1}{v}$.

Бываютъ однако случаи, когда a задано условіями опыта. Такъ, напримѣръ, извѣстно, что если плоскость XY раздѣляетъ двѣ различныя среды, то углы φ и χ падающаго и преломленнаго луча должны удовлетворять условію

$$\frac{\sin\varphi}{\sin\chi} = \frac{v_1}{v_2} = n \qquad \ldots\ldots (2)$$

гдѣ n — показатель преломленія, или иначе

$$a_1 = \frac{\sin\varphi}{v_1} = \frac{\sin\chi}{v_2} = a_2 \qquad \ldots\ldots (3)$$

а это означаетъ, что скорости движенія фазъ по оси X для падающаго, отраженнаго и преломленнаго луча должны быть одинаковы. Поэтому, если уголъ φ, а потому и a_1, въ первой средѣ даны, то можетъ оказаться, что равное ему a_2 для второй среды будетъ болѣе $\frac{1}{v_2}$.

Конечно, если

$$\frac{\sin\varphi}{v_1} > \frac{1}{v_2},$$

то

$$\sin\varphi > n,$$

а потому этотъ случай возможенъ только, когда $n < 1$, т.-е. когда вторая среда менѣе преломляющая, чѣмъ первая.

Но если дѣйствительно, по условію опыта, $a > \frac{1}{v_2}$, то $\sin\chi$ дѣлается больше единицы и слѣдовательно, *нельзя подыскать для преломленнаго луча такого постояннаго направленія* χ, при которомъ условіе (2) было бы соблюдено. Какъ извѣстно, мы получаемъ при

этомъ такъ называемое полное внутреннее отраженіе, т.-е. падающій лучъ цѣликомъ отражается, не преломляясь.

Изъ этого не слѣдуетъ, однако, что, при такихъ условіяхъ на границѣ, распространеніе свѣта во второй средѣ дѣлается совершенно невозможнымъ. Какъ увидимъ ниже, при этихъ условіяхъ свѣтъ проникаетъ и вторую среду, но, во-первыхъ, сила свѣта быстро убываетъ съ глубиною подъ плоскостью раздѣла, а во-вторыхъ, уголъ χ дѣлается перемѣннымъ во времени.

Положимъ, дѣйствительно, $a > \frac{1}{v_2}$; тогда b дѣлается мнимымъ. Пусть

$$b = -ik \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

Уравненія (1), (2), (3) даютъ

$$a^2 - k^2 = \frac{\varepsilon_2 \mu_2}{c^2} = \frac{1}{v_2^2};$$

$$k = \sqrt{\frac{sin^2\varphi}{v_1^2} - \frac{1}{v_1^2}} = \frac{\sqrt{sin^2\varphi - n^2}}{v_1} \ldots\ldots\ldots (5)$$

$$\frac{k}{a} = \frac{\sqrt{sin^2\varphi - n^2}}{sin\varphi.} \ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

При $b = -ik$ рѣшенія предыдущаго параграфа измѣнятся а именно:

$$e^{ra} = e^{-\frac{2\pi}{T}k.z} . e^{i\frac{2\pi}{T}(t-ax)} =$$

$$= e^{-\frac{2\pi}{T}k.z}\left[cos\frac{2\pi}{T}(t-ax) + i\ sin\frac{2\pi}{T}(t-ax)\right]$$

а это означаетъ, что амплитуды всѣхъ напряженій съ увеличеніемъ z быстро убываютъ, т.-е. свѣтъ замѣтенъ лишь на небольшой глубинѣ подъ плоскостью раздѣла обоихъ тѣлъ.

Далѣе, соотношенія между амплитудами принимаютъ слѣдующій видъ:

$$C = -\frac{a}{k.} Ai \qquad L = \frac{c}{\mu} k\ Bi$$

$$M = \frac{\varepsilon}{c}\frac{1}{k} Ai \qquad N = \frac{c}{\mu} a\ B.$$

Полученныя нами мнимыя амплитуды означаютъ лишь, что необходимо измѣнить фазу на 90°.

Дѣйствительно, при $a = \frac{\pi}{2}$

$$e^{\pm ia} = \pm i$$

Принявъ все это во вниманіе, мы можемъ для этого случая придать окончательнымъ рѣшеніямъ слѣдующій видъ:

$$E_x = A \quad e^{-\frac{2\pi}{T}kz} . \cos \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

$$E_z = A \frac{a}{k} \quad e^{-\frac{2\pi}{T}kz} . \sin \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

$$M_y = -A \frac{\varepsilon}{c} \frac{1}{k} e^{-\frac{2\pi}{T}kz} . \sin \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

$$M_x = B \frac{c}{\mu} k \; e^{-\frac{2\pi}{T}kz} . \cos \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

$$M_z = B \frac{c}{\mu} a \; e^{-\frac{2\pi}{T}kz} . \sin \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

$$E_y = B \quad e^{-\frac{2\pi}{T}kz} . \sin \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

Уголъ ϕ_2, образуемый линіями силъ съ осью Z, получится изъ

$$tg\,\phi_2 = \frac{E_x}{E_z} = \frac{M_x}{M_z} = \frac{k}{a} \cot \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

Какъ видимъ, этотъ уголъ мѣняется со временемъ.

Такимъ образомъ, составляющія напряженій E_x и E_z съ одной стороны, и M_x и M_z — съ другой, имѣя разность фазъ въ 90°, даютъ въ плоскости паденія вращающіяся электрическое и магнитное поле.

Потокъ энергіи, будучи перпендикуляренъ къ E и M, тоже, слѣдовательно, образуетъ вращающееся въ плоскости ZX поле,

и направленіе луча, характеризуемое угломъ χ, мѣняется со временемъ

$$tg\,\chi = -\frac{1}{tg\,\psi_2} = -\frac{a}{k}\,tg\,\frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

Итакъ, хотя въ случаѣ полнаго внутренняго отраженія, т.-е. для $sin\varphi > n$, и нельзя подыскать такого *постояннаго направленія* преломленнаго луча, которое бы удовлетворяло пограничнымъ условіямъ, тѣмъ не менѣе, преломленный лучъ существуетъ, но имѣетъ *направленіе мѣняющееся со временемъ* по вышеуказанному закону.

5) Форма линій силъ и лучей во второй средѣ.

Изъ формулы

$$tg\,\psi_2 = \frac{k}{a}\,cot\,\frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

видно, что уголъ наклона линій силъ не зависитъ отъ z и что, кромѣ того, онъ мѣняется со временемъ, но такъ что ψ_2 для нѣкотораго времени t_1, въ какой-либо точкѣ x_1, будетъ имѣть то же самое значеніе, которое онъ имѣлъ въ другое время t_2, но въ другой точкѣ x_2, опредѣляемой уравненіемъ

$$t_1 - ax_1 = t_2 - ax_2$$

или

$$t_1 - t_2 = a\,(x_1 - x_2)$$

Другими словами: *линіи силъ, сохраняя свою форму, двигаются параллельно оси x со скоростью* $\frac{1}{a}$, т.-е. съ тою именно скоростью, которая предписана пограничными условіями и которая равна скорости движенія фазъ по оси x въ первой средѣ

$$\frac{1}{a} = \frac{v_1}{sin\varphi}$$

Имѣя это въ виду, мы можемъ ограничиться опредѣленіемъ формы линій силъ для одного какого-либо момента времени, напримѣръ, для $t = o$.

Тѣ же замѣчанія можно сдѣлать и о формѣ линій потоковъ энергіи, т.-е. о формѣ лучей, которые всегда остаются перпендикулярными къ линіямъ силъ.

Полученныя нами мнимыя амплитуды означаютъ лишь, что необходимо измѣнить фазу на 90^0.

Дѣйствительно, при $a = \frac{\pi}{2}$

$$e^{\pm ia} = \pm i$$

Принявъ все это во вниманіе, мы можемъ для этого случая придать окончательнымъ рѣшеніямъ слѣдующій видъ:

$$Ex = A \qquad e^{-\frac{2\pi}{T}kz} . \cos \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

$$Ez = A \frac{a}{k} \quad e^{-\frac{2\pi}{T}kz} . \sin \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

$$My = -A \frac{\varepsilon}{c} \frac{1}{k} e^{-\frac{2\pi}{T}kz} . \sin \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

$$Mx = B \frac{c}{\mu} k \; e^{-\frac{2\pi}{T}kz} . \cos \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

$$Mz = B \frac{c}{\mu} a \; e^{-\frac{2\pi}{T}kz} . \sin \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

$$Ey = B \qquad e^{-\frac{2\pi}{T}kz} . \sin \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

Уголъ ψ_2, образуемый линіями силъ съ осью Z, получится изъ

$$tg\, \psi_2 = \frac{Ex}{Ez} = \frac{Mx}{Mz} = \frac{k}{a} \cot \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

Какъ видимъ, этотъ уголъ мѣняется со временемъ.

Такимъ образомъ, составляющія напряженій Ex и Ez съ одной стороны, и Mx и Mz — съ другой, имѣя разность фазъ въ 90^0, даютъ въ плоскости паденія вращающіяся электрическое и магнитное поле.

Потокъ энергіи, будучи перпендикуляренъ къ E и M, тоже, слѣдовательно, образуетъ вращающееся въ плоскости ZX поле,

и направленіе луча, характеризуемое угломъ χ, мѣняется со временемъ

$$tg\,\chi = -\frac{1}{tg\,\psi_2} = -\frac{a}{k}\,tg\,\frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

Итакъ, хотя въ случаѣ полнаго внутренняго отраженія, т.-е. для $sin\varphi > n$, и нельзя подыскать такого *постояннаго направленія* преломленнаго луча, которое бы удовлетворяло пограничнымъ условіямъ, тѣмъ не менѣе, преломленный лучъ существуетъ, но имѣетъ *направленіе мѣняющееся со временемъ* по вышеуказанному закону.

5) Форма линій силъ и лучей во второй средѣ.

Изъ формулы

$$tg\,\psi_2 = \frac{k}{a}\,cot\,\frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

видно, что уголъ наклона линій силъ не зависитъ отъ z и что, кромѣ того, онъ мѣняется со временемъ, но такъ что ψ_2 для нѣкотораго времени t_1, въ какой-либо точкѣ x_1, будетъ имѣть то же самое значеніе, которое онъ имѣлъ въ другое время t_2, но въ другой точкѣ x_2, опредѣляемой уравненіемъ

$$t_1 - ax_1 = t_2 - ax_2$$

или

$$t_1 - t_2 = a\,(x_1 - x_2)$$

Другими словами: *линіи силъ, сохраняя свою форму, двигаются параллельно оси x со скоростью* $\frac{1}{a}$, т.-е. съ тою именно скоростью, которая предписана пограничными условіями и которая равна скорости движенія фазъ по оси x въ первой средѣ

$$\frac{1}{a} = \frac{v_1}{sin\varphi}$$

Имѣя это въ виду, мы можемъ ограничиться опредѣленіемъ формы линій силъ для одного какого-либо момента времени, напримѣръ, для $t = o$.

Тѣ же замѣчанія можно сдѣлать и о формѣ линій потоковъ энергіи, т.-е. о формѣ лучей, которые всегда остаются перпендикулярными къ линіямъ силъ.

Приравнявъ $tg\,\psi_2$ производной $\frac{dx}{dz}$ и замѣтивъ, что

$$\frac{2\pi}{T}\,a = \frac{2\pi}{T}\cdot\frac{\sin\varphi}{v} = \frac{2\pi}{\lambda x}$$

гдѣ λx— разстояніе между одинаковыми фазами по оси X, получимъ

$$\frac{dx}{dz} = -\frac{k}{a}\,\cot 2\pi\,\frac{x}{\lambda x}.$$

Интегрируя отъ 0 до z при измѣненіи x отъ x_1 до x, получимъ уравненіе кривыхъ линій силъ:

$$\int_0^z dz = -\frac{k}{a}\int_{x_1}^{x} tg\left(2\pi\frac{x}{\lambda x}\right).dx$$

$$z = \frac{k}{a}\,\frac{\lambda x}{2\pi}\,lg\left(\frac{\cos 2\pi\frac{x}{\lambda x}}{\cos 2\pi\frac{x_1}{\lambda x}}\right) \quad \text{. . . . . (II}e\text{)}$$

и уравненія лучей, къ нимъ перпендикулярныхъ:

$$\int_0^z dz = \frac{a}{k}\cdot\int_{x_1}^{x}\cot\left(2\pi\frac{x}{\lambda x}\right)dx.$$

$$z = \frac{a}{k}\,\frac{\lambda x}{2\pi}\,lg\left(\frac{\sin 2\pi\frac{x}{\lambda x}}{\sin 2\pi\frac{x_1}{\lambda x}}\right) \quad \text{. . . . . (II}f\text{)}$$

Кривыя эти показаны на прилагаемыхъ чертежахъ (таблица II-я) и будутъ нами разобраны ниже.

Составляющія потоковъ энергіи по оси Z и X, какъ для луча, поляризованнаго въ плоскости паденія, такъ и для луча, поляризованнаго перпендикулярно къ этой плоскости, будутъ совершенно одинаковы, если амплитуды обоихъ лучей одинаковы. Легко видѣть, что, если

$$A = B$$

то

$$Ex\,My = -Ey\,Mx,$$
$$Ey\,Mz = -Ez\,My,$$

Поэтому мы можемъ для каждаго изъ этихъ лучей написать отдѣльно

$$f_z = \frac{c}{4\pi} E_x M_y = -A^2 \frac{\varepsilon}{4\pi k} \cdot e^{-\frac{4\pi k}{T} z} \sin \frac{2\pi}{T}(t - ax) . \cos \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

$$f_x = -\frac{c}{4\pi} E_z M_y = A^2 \frac{\varepsilon a}{4\pi k^2} e^{-\frac{4\pi k}{T} z} . \sin^2 \frac{2\pi}{T}(t - ax)$$

или

$$f_z = -A^2 \frac{\varepsilon}{8\pi k} \cdot e^{-\frac{4\pi k}{T} z} \sin \frac{4\pi}{T}(t - ax)$$

$$f_x = A^2 \frac{\varepsilon a}{8\pi k^2} \cdot e^{-\frac{4\pi k}{T} z} \left(1 - \cos \frac{4\pi}{T}(t - ax)\right).$$

Выраженіе f_z показываетъ, что свѣтовая энергія колеблется по направленію Z съ періодомъ, $T/2$ т.-е. за время полнаго періода свѣтоваго колебанія T энергія успѣваетъ два раза войти изъ первой среды во вторую и два раза выйти обратно. Количество энергіи, вышедшей изъ первой среды во вторую за время $T/4$, т.-е. за одну половину періода колебанія энергіи, равно количеству энергіи, вышедшей обратно изъ второй среды въ первую за время другой половины періода колебанія энергіи.

Поэтому, понятно, энергія падающаго луча цѣликомъ возвращается въ отраженномъ лучѣ. Однако выраженіе f_z, а въ особенности наши кривыя, показываютъ, что входъ и выходъ энергіи въ разныхъ мѣстахъ плоскости раздѣла (для разныхъ x) совершается не въ одно время, такъ что въ то время какъ въ однихъ мѣстахъ $f_z > o$, энергія входитъ изъ первой среды во вторую, въ другихъ мѣстахъ, отстоящихъ отъ первыхъ на длину

$$x_1 = \frac{T}{4a} = \frac{\lambda_x}{4}$$

$f_z < o$ энергія выходитъ изъ второй среды въ первую.

Внутри второй среды пути энергіи, т.-е. лучи свѣта, кривыя и имѣютъ видъ гирляндъ, расположенныхъ по оси X.

Выраженіе f_x всегда (для любого t) и вездѣ (для любого x) имѣетъ положительное значеніе, и это обстоятельство дало поводъ

недоразумѣнію, будто мы имѣемъ здѣсь дѣло съ самостоятельнымъ лучемъ свѣта, идущимъ вдоль плоскости раздѣла. Кромѣ того, этотъ фиктивный лучъ f_x обладаетъ особеннымъ свойствомъ: въ немъ свѣтовыя колебанія происходятъ по тому же направленію x, т.-е. *колебанія эти продольныя.* Хотя P. Drude [1]) и полагаетъ, что это обстоятельство не противорѣчитъ поперечности свѣтовыхъ колебаній, которая будто бы имѣетъ мѣсто лишь при волнахъ *постоянной амплитуды,* но намъ кажется, что и это недоразумѣніе отпадаетъ, если принять во вниманіе, что f_x нельзя разсматривать какъ самостоятельный лучъ свѣта, а лишь какъ проекцію лучей на ось X; на самомъ же дѣлѣ лучи свѣта во второй средѣ имѣютъ кривую форму, показанную на таблицѣ II (толстыми линіями) и колебанія въ нихъ *строго поперечны.*

6) Условія на границѣ.

Посмотримъ теперь, что происходитъ въ первой средѣ, въ которой находятся падающій и отраженный лучи. Сперва разсмотримъ отдѣльно тотъ лучъ, котораго электрическія колебанія параллельны въ плоскости паденія; явленія въ другомъ лучѣ совершенно аналогичны и разница лишь въ томъ, что E замѣняется черезъ M, ε — черезъ $-\mu$, и наоборотъ.

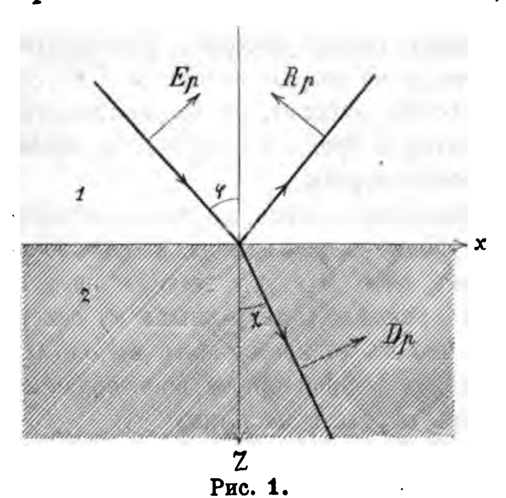


Рис. 1.

Пусть амплитуды электрическихъ колебаній падающаго и отраженнаго луча будутъ E и R, тогда (Рис. 1) составляющія электрическаго поля по оси X и Z будутъ

$$E_x = (E - R)\cos\varphi$$
$$E_z = -(E + R)\sin\varphi$$

и уголъ наклона линій силъ въ первой средѣ ψ_1 будетъ

$$tg\psi_1 = \frac{E_x}{E_z} = -\frac{E-R}{E+R}\cdot\frac{1}{tg\,\varphi} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

---

[1]) P. Drude. Lehrbuch der Optik. 1906. p. 286.

На границѣ двухъ тѣлъ, т.-е. въ плоскости XY, должно быть соблюдены условія равенства тангенціальныхъ составляющихъ электрическихъ напряженій и равенства нормальныхъ составляющихъ электрическихъ индукцій, т.-е.

$$E_1x = E_2x$$
$$\varepsilon_1 E_1 z = \varepsilon_2 E_2 z$$

откуда

$$\frac{E_1x}{E_1z} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{E_2x}{E_2z}$$

и для ψ_2, угла наклоненія электрическихъ линій силъ къ оси Z во второй средѣ, имѣемъ

$$tg\ \psi_1 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} tg\ \psi_2$$

слѣдовательно, пограничныя условія требуютъ:

$$\frac{E-R}{E+R} \cdot \frac{1}{tg\,\varphi} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad \frac{1}{tg\chi}$$

При полномъ внутреннемъ отраженіи $E = R$, но такъ какъ уголъ ψ_2 а также и χ перестаютъ быть постоянными, то и уголъ ψ_1 долженъ мѣняться со временемъ; а это послѣднее, при постоянномъ φ, возможно лишь, когда E и R имѣютъ разныя фазы.

Дѣйствительно, пусть колебанія R опережаютъ колебанія F на уголъ δ, тогда получимъ:

$$tg\psi_1 = -\frac{sin\ a - sin\ (a+\delta)}{sin\ a + sin\ (a+\delta)} \frac{1}{tg\varphi} = \frac{tg\ \delta/_2 . cot\ (a+\delta/_2)}{tg\varphi}$$

гдѣ

$$a = \frac{2\pi}{T}\ (t - ax - bz)$$

въ то же время согласно § 5 можно положить

$$tg\ \psi_2 = \frac{k}{a}\ \ cot \left[\frac{2\pi}{T}(t - ax) + \gamma\right]$$

гдѣ γ та фаза, на которую колебанія преломленнаго луча опережаютъ колебанія падающаго луча. Для удовлетворенія погранич-

$$E_1 z = -\left[E \sin\alpha + R \sin(\alpha + \delta) \right] \sin\varphi = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} E_2 z = -n^2 E_2 z$$

$$M_1 y = \left[E \sin\alpha + R \sin(\alpha + \delta) \right] \sqrt{\varepsilon_1} = M_2 y.$$

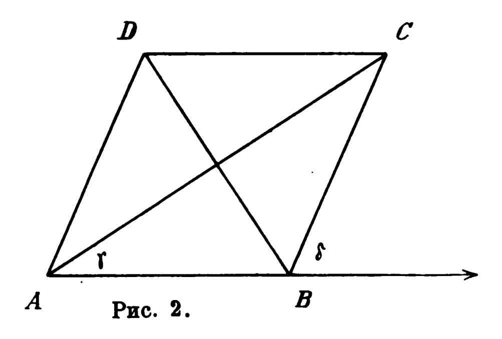


Рис. 2.

то, отложивъ по горизонтальному направленію (рис. 2) $AB = E$ и подъ угломъ δ, $BC = R$, построимъ параллелограммъ $ABCD$, который вслѣдствіе равенства $E = R$ обращается въ ромбъ.

Въ этомъ ромбѣ

$$DB = AB - AD = \frac{E_2 x}{\cos\varphi}$$

$$AC = AB + BC = \frac{n^2}{\sin\varphi} . E_2 z$$

$$AC = AB + BC = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_1}} M_2 y.$$

Вслѣдствіе геометрическихъ свойствъ ромба можно прямо видѣть, что:

1) разность фазъ между AC и AB, т.-е. между падающими и преломленными магнитными колебаніями γ вдвое меньше разности фазъ между тѣми же колебаніями въ падающемъ и отраженномъ лучѣ

2) разность фазъ между Ez и Mz равна нулю, тогда какъ

3) разность фазъ между Ex и Ez а также и Ex и My равна 90^0.

4) Площадь ромба, пропорціональная $AC.BD$, пропорціональна $Ex\ My$, или количеству энергіи, входящей изъ первой среды во вторую сквозь плоскость XY; а потому, при данномъ φ, наибольшій потокъ энергіи будетъ имѣть мѣсто при наибольшемъ δ.

5) Съ другой стороны, такъ какъ AC перпендикулярно къ DB, т.-е. разность фазъ между Ex и My равна 90^0, то полное ко-

личество энергіи, прошедшее сквозь XY за цѣлое число періодовъ будетъ равно нулю, ибо

$$\int_0^T sin\frac{2\pi}{T}t . sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \beta\right).dt = \frac{T}{2\pi}\ cos\beta,$$

что при $\beta = 90^0$ равно нулю.

Слѣдовательно, энергія лишь колеблется по оси z.

6) Такъ какъ E_z и M_y въ одной фазѣ, то составляющая потока энергіи по оси x будетъ всегда положительная.

7) Изъ чертежа видно, что

$$AC = 2AB\ cos\frac{\delta}{2}$$

$$DB = 2AB\ sin\frac{\delta}{2}$$

и слѣдовательно

$$E_2x = DB.cos\varphi = 2E\ sin\frac{\delta}{2}\ cos\varphi$$

$$E_2z = AC.\frac{sin\varphi}{n^2} = 2E\frac{cos\frac{\delta}{2}}{n^2}.sin\varphi$$

$$M_2y = AC\sqrt{\varepsilon_1} = 2E\sqrt{\varepsilon_1}\ cos\frac{\delta}{2}$$

Для другого луча, поляризованнаго въ плоскости паденія мы получимъ тоже ромбъ, но лишь съ угломъ δ' вмѣсто δ. Кромѣ того, тѣ линіи, которыя въ первомъ ромбѣ изображали электрическія напряженія, будутъ во второмъ ромбѣ обозначать напряженія магнитныя и наоборотъ.

8) Форма линій силъ и лучей въ первой средѣ.

Мы выяснили, что происходитъ въ первой средѣ у плоскости раздѣла XY; изслѣдуемъ теперь, что происходитъ выше этой плоскости для $z < o$.

Пусть амплитуды падающаго и отраженнаго лучей равны.

Проведемъ новую плоскость XY такъ, чтобы при $z=0$ фазы обоихъ лучей были одинаковы, тогда будемъ имѣть:

$$E = Asin\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{sin\varphi . x + cos\varphi . z}{v}\right)$$

$$R = Asin\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{sin\varphi . x - cos\varphi . z}{v}\right)$$

Эти выраженія показываютъ, что для Z не равнаго нулю между R и E имѣется разность фазъ δ, причемъ

$$\delta = \frac{4\pi}{T} \cdot \frac{\cos\varphi}{v} z = 4\pi \frac{z}{\lambda z} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

гдѣ λz —разстояніе между одинаковыми фазами каждаго изъ лучей, считаемое по оси Z.

Въ тѣхъ мѣстахъ, гдѣ δ имѣетъ конечное значеніе, мы должны получить вращающееся въ плоскости ZX электрическое или магнитное поле, а слѣдовательно и направленіе потока энергіи будетъ тоже мѣняться со временемъ. Опять

$$tg\psi_1 = \frac{tg\frac{\delta}{2}}{tg\varphi} \cdot \cot\left[\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{\sin\varphi . x + \cos\varphi . z}{v}\right) + \frac{\delta}{2}\right]$$

или, подставляя вышеприведенное значеніе δ и обозначая $\frac{\sin\varphi}{Tv} = \frac{1}{\lambda x}$, получаемъ

$$tg\psi_1 = \frac{tg\left(2\pi \frac{z}{\lambda z}\right)}{tg\,\varphi} \cdot \cot\, 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda x}\right)$$

Что касается формы кривыхъ линій силъ въ первой средѣ, то опять замѣтимъ, что форма ихъ со временемъ не мѣняется, только онѣ двигаются параллельно оси x съ равномѣрною скоростью

$$vx = \frac{\lambda x}{T} = \frac{v}{\sin\varphi}$$

поэтому достаточно изслѣдовать форму этихъ кривыхъ для $t = o$, положивъ

$$\frac{dx}{dz} = -\frac{tg\left(2\pi \frac{z}{\lambda z}\right)}{tg\varphi} \cdot \cot\left(2\pi \frac{x}{\lambda x}\right)$$

имѣемъ:

$$tg\varphi \cdot \int_{x_1}^{x} tg\left(2\pi \frac{x}{\lambda x}\right) dx = -\int_{z_1}^{z} tg\left(2\pi \frac{z}{\lambda z}\right) dz$$

$$-tg\varphi \cdot \frac{\lambda x}{2\pi}\, lg \frac{\cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda x}\right)}{\cos\left(2\pi \frac{x_1}{\lambda x}\right)} = \frac{\lambda z}{2\pi}\, lg \frac{\cos\left(2\pi \frac{z}{\lambda z}\right)}{\cos\left(2\pi \frac{z_1}{\lambda z}\right)}$$

или, такъ какъ

$$\frac{\lambda_x}{\lambda_z} = \frac{Tv}{sin\varphi} \cdot \frac{cos\varphi}{Tv} = cot\varphi,$$

то

$$cos\left(2\pi\frac{x}{\lambda_x}\right) \cdot cos\left(2\pi\frac{z}{\lambda_z}\right) = cos\left(2\pi\frac{x_1}{\lambda_x}\right) \cdot cos\left(2\pi\frac{z_1}{\lambda_z}\right) \ldots\ldots \quad (Ie)$$

Для кривыхъ линій потоковъ энергіи получимъ точно также

$$sin\left(2\pi\frac{x}{\lambda_x}\right) sin\left(2\pi\frac{z_1}{\lambda_z}\right) = sin\left(2\pi\frac{x_1}{\lambda_x}\right) sin\left(2\pi\frac{z}{\lambda_z}\right) \ldots\ldots \quad (If)$$

На таблицѣ I показаны формы этихъ кривыхъ. Подробное разсмотрѣніе ихъ сдѣлаемъ ниже (§ 9).

Составляющія потоковъ энергіи по осямъ Z и X для луча, поляризованнаго въ плоскости паденія и для луча поляризованнаго перпендикулярно къ этой плоскости, будутъ одинаковы, а именно:

$$f_z = \frac{c}{4\pi} E_x M_y = -\frac{c}{4\pi} E_y M_x$$

$$f_x = -\frac{c}{4\pi} E_z M_y = \frac{c}{4\pi} E_y M_z$$

а такъ какъ

$$E_x = (E - R)\,cos\varphi = -2E\,cos\varphi\,sin\frac{\delta}{2}\,cos\,2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda_x}\right)$$

$$E_z = -(E + R)\,sin\varphi = -2E\,sin\varphi\,cos\frac{\delta}{2}\,sin\,2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda_x}\right)$$

$$M_y = (E + R)\sqrt{\varepsilon_1} = 2E\sqrt{\varepsilon_1}\,cos\frac{\delta}{2}\,sin\,2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda_x}\right)$$

то

$$f_z = -\frac{c}{2\pi} E^2 sin\delta \,.\, cos\varphi \sqrt{\varepsilon_1}\, sin\,4\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda_x}\right)$$

$$f_x = 4\,\frac{c}{4\pi} E^2 cos^2\delta \,.\, sin\varphi \sqrt{\varepsilon_1}\, sin^2\,2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda_x}\right)$$

Это означаетъ, что по оси Z энергія движется взадъ и впередъ, образуя *стоячую волну* съ различными фазами параллельно оси x; составляющая же потока энергіи по X хотя и мѣняется со временемъ, но всегда положительная, поэтому по оси X энергія образуетъ *проходящую волну*.

Мы видимъ, что въ первой средѣ у насъ получаются явленія вполнѣ аналогичныя тѣмъ, которыя мы уже разобрали во второй средѣ при полномъ внутреннемъ отраженіи (см. стр.).

Какъ тамъ, такъ и здѣсь, fx нельзя считать за *самостоятельный* лучъ свѣта, идущій параллельно плоскости раздѣла, иначе мы и здѣсь должны будемъ допустить существованіе *продольныхъ* свѣтовыхъ колебаній. Болѣе того, здѣсь намъ нельзя уже будетъ, для объясненія такой аномаліи, сослаться на „колебанія съ перемѣнной амплитудой", ибо амплитуда въ первой средѣ несомнѣнно постоянная.

При нормальномъ паденіи $\sin\varphi = o$, $fx = o$, $\lambda_x = \infty$, и мы получаемъ только стоячія волны.

$$fz = -\frac{c}{8\pi} E^2 \sin\left(2\pi\frac{z}{\lambda}\right) \sin\left(4\pi\frac{t}{T}\right).$$

Какъ извѣстно, стоячія волны при $\varphi = 45^0$ и при $\varphi = o$ были обнаружены на опытѣ O. Wiener'омъ.

9) **Объясненіе чертежей.**

На обѣихъ таблицахъ чертежей линіи силъ обозначены тонкими линіями, а перпендикулярныя къ нимъ траекторіи энергіи или лучи—толстыми линіями.

Уголъ паденія φ принятъ для простоты въ 45^0; при этомъ $\lambda_x = \lambda_z$.

Таблица I-я изображаетъ поле падающаго и отраженнаго лучей при разности фазъ $\delta = o$ (формула Ie стр. 35). Это будетъ случай отраженія отъ идеальнаго зеркала или случай предѣльнаго угла полнаго внутренняго отраженія $\sin\varphi = n$. Слѣдовательно, при $\varphi = 45^0$ для этого случая необходимо, чтобы вещество первой среды имѣло $n = 1{,}41$.

При другомъ n нашъ чертежъ немного измѣнится, а именно: λ_x не будетъ равно λ_z; но это измѣненіе для насъ пока несущественно.

Мы видимъ, что все поле распредѣлено на отдѣльные квадраты, внутри которыхъ находятся замкнутыя линіи силъ. Эти линіи силъ *электрическія* для луча, поляризованнаго перпендикулярно къ плоскости паденія; они же представляютъ собою *магнитныя* линіи силъ для луча, поляризованнаго въ плоскости паденія. Разница лишь въ томъ, что для второго случая нужно себѣ представить плоскость раздѣла xy перемѣщенной на $\lambda_z/4$ выше, т.-е. по направленію $-z$.

Упомянутые выше квадраты, параллельные осямъ X и Z, представляютъ собою тоже линіи силъ. Въ тѣхъ мѣстахъ, гдѣ въ данный моментъ времени $t=o$, уголъ $\psi=o$ или 180^0, т.-е. гдѣ

$$tg\,\psi_1 = \frac{-1}{tg\,\varphi} . tg\left(2\pi\frac{z}{\lambda z}\right) . ctg\left(2\pi\frac{x}{\lambda x}\right) = o$$

а именно, гдѣ $2\pi\frac{x}{\lambda x}$ равно нечетному числу $\pi/2$ или

$$x=(2\nu+1)\frac{\lambda x}{4}$$

при чемъ ν какое-либо цѣлое число,—тамъ мы будемъ имѣть прямую линію силъ, параллельную оси Z. Гдѣ $\psi=90$, а именно для

$$z=(2\nu+1)\frac{\lambda z}{4},$$

линіи силъ параллельны оси X.

Между $z=o$ и $z=-\frac{\lambda z}{4}$ значенія $tg\left(2\pi\frac{z}{\lambda z}\right)$ отрицательно; въ то же время между $x=o$ и $x=+\frac{\lambda x}{4}$ значеніе $cotg\left(2\pi\frac{x}{\lambda x}\right)$ положительно; слѣдовательно, въ маломъ квадратѣ o, $-\frac{\lambda z}{4}$, $+\frac{\lambda x}{4}$, o значеніе $tg\,\psi_1$ положительно, и линіи силъ идутъ слѣва направо, понижаясь. Легко также сообразить, что въ большомъ квадратѣ $+\frac{\lambda x}{4}$, $+\frac{3\lambda x}{4}$, $-\frac{\lambda z}{4}$, $-\frac{3\lambda z}{4}$, всѣ замкнутыя линіи силъ имѣютъ направленіе по стрѣлкѣ часовъ. Въ смежныхъ же квадратахъ направленія линій силъ взаимно противоположны.

Линіи потоковъ энергіи (формула If стр. 35) направлены всѣ слѣва направо, т.-е. по направленію $+X$. Только иногда онѣ притомъ повышаются, иногда понижаются.

Съ теченіемъ времени t весь чертежъ нужно себѣ представить двигающимся равномѣрно по оси $+X$ со скоростью $\frac{v_1}{sin\varphi}$.

Фиксируемъ какую-либо неподвижную линію $x=x_1$, тогда увидимъ, что при движеніи всѣхъ линій по направленію $+X$ энергія будетъ колебаться параллельно Z, при чемъ, въ то время какъ между $z=o$ и $z=-\frac{1}{4}\lambda z$ энергія будетъ колебаться вверхъ

и внизъ, въ мѣстахъ между $z = -\frac{1}{4}\lambda_z$ и $z = -\frac{1}{2}\lambda_z$ колебанія энергіи будутъ происходить въ противуположномъ направленіи т.-е. внизъ и вверхъ. Энергія, а также и линіи силъ дадутъ по оси Z *стоячую волну*, съ пучностями для

$$z = (2\nu + 1)\frac{\lambda_z}{4}.$$

По оси x мы получимъ, наоборотъ, *проходящую волну*.

Если уголъ паденія φ не равенъ 45°, но все же $E = R$, то всѣ разсужденія останутся прежними, только квадраты линій силъ удлинятся по X или по Z въ прямоугольные четыреугольники. Наконецъ, если E не равно R, а больше R, что имѣемъ мѣсто при простомъ отраженіи съ преломленіемъ, то весь чертежъ нашъ скосится такъ, что вмѣсто вертикальныхъ линій получатся наклонныя подъ угломъ

$$tg\,\psi_1 = -\frac{E - R}{E + R}\,\frac{1}{tg\varphi},$$

и прямоугольники обратятся въ параллелограммы.

Таблица II-я изображаетъ поле лучей у плоскости раздѣла двухъ средъ при полномъ внутреннемъ отраженіи.

Здѣсь плоскость раздѣла $z = o$ помѣщена ниже чѣмъ въ таблицѣ I на величину

$$z = \frac{\lambda_z}{2\pi}\cdot\frac{\delta}{2}$$

согласно формулы (1) § 8. Для полноты картины нужно себѣ представить чертежъ таблицы I надставленнымъ на чертежъ таблицы II и все вмѣстѣ двигающимся по оси $+X$ съ равномѣрной скоростью $\frac{v}{\sin\varphi}$.

Мы видимъ здѣсь, что линіи силъ во второй средѣ, построенныя по формулѣ II*e* § 5 (стр. 26), представляютъ собою продолженіе линій силъ въ первой средѣ съ *переломомъ на границѣ*, какъ того требуютъ пограничныя условія. Для магнитныхъ линій силъ, при $\mu_1 = \mu_2$, такого перелома не будетъ и кромѣ того, или вѣрнѣе именно вслѣдствіе этого, δ' будетъ другое.

То же самое можно сказать и про линіи потоковъ энергіи (формула II*f* стр. 26). Энергія падающаго луча какъ бы ныряетъ

во вторую среду, чтобы затѣмъ вновь цѣликомъ появиться въ порвой средѣ въ лучѣ отраженномъ. Но входъ и выходъ энергіи происходитъ для разныхъ мѣстъ въ разное время, а для даннаго времени входъ энергіи во вторую среду происходитъ въ мѣстахъ отстоящихъ другъ отъ друга на половинѣ разстоянія между одинаковыми фазами по оси **X**.

Итакъ, общая картина такова:

1) При углѣ φ, меньшемъ предѣльнаго $sin\varphi < n$, мы имѣемъ преломленный лучъ *постояннаго* направленія χ; энергія частью входитъ во вторую среду.

2) При предѣльномъ углѣ $sin\varphi = n$, $x = 90$ но интенсивность преломленнаго луча равна нулю, энергія не входитъ во вторую среду вовсе.

3) При дальнѣйшемъ увеличеніи φ, хотя преломленный лучъ и не имѣетъ *постояннаго* направленія, но все же энергія входитъ во вторую среду на нѣкоторое время и на нѣкоторую глубину. Приэтомъ разности фазъ δ и γ падающаго, отраженнаго и преломленнаго лучей растутъ непрерывно, разность же $\delta - \delta'$ имѣетъ максимумъ и затѣмъ вновь опускается до нуля при $\varphi = 90^0$.

4) Наконецъ, при $\varphi = 90$ лучъ скользитъ по поверхности раздѣла и во вторую среду не входитъ.

А. Эйхенвальдъ.

Ueber die Bewegung der Energie bei Totalreflexion.

Definiert man den Lichtstrahl als Strömugslinie der Energie und bedenkt man, das diese Stromungslinien immer senkrecht zu den elektrischen und magnetischen Kraftlinien stehen, so erhält man einen klaren Einblick in den Vorgang den Totalreflexion.

In diesem Falle, nämlich, entsteht im zweiten Medium eine Phasen-differenz der X und Z komponenten der Feldintensität und wir erhalten in der ZX Ebene Drehfelder. Folglich müssen auch die Strömungslinien der Energie mit der zeit und mit dem Orte ihre Richtung ändern. Für $t=o$ erhalten wir die in der Tabelle II gezeichneten (elektriche) Kraftlinien und Strömungslinien der Energie (Stark ausgezogene und mit einem Pfeil versehene Linien). Für $t>o$ bewegt sich die ganze Figur in der Richtung $+X$ mit gleichförmlichen Geschwindigkeit $\frac{1}{a}$, welche gleich der Phasengeschwindigkeit längs X ist.

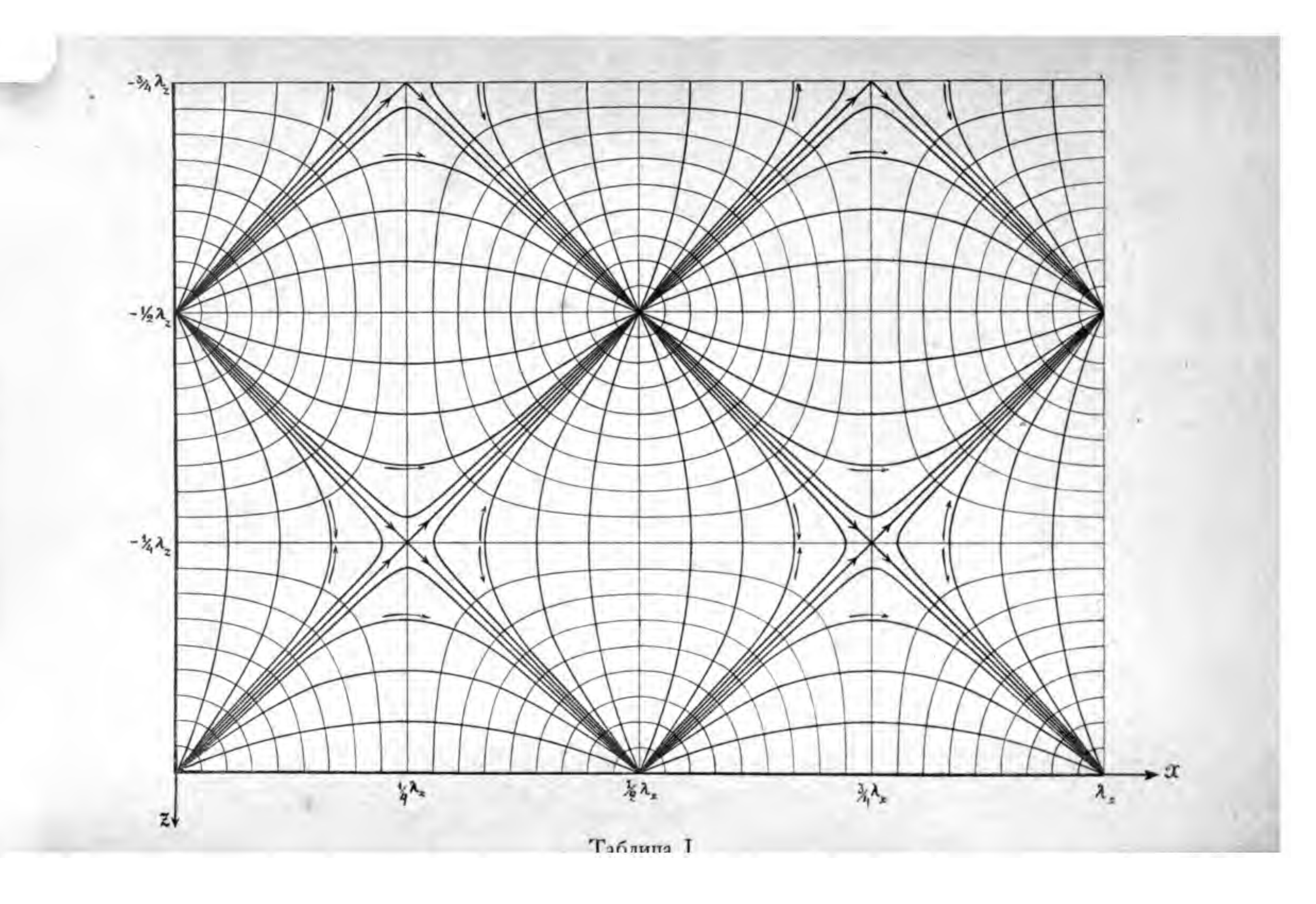
Im ersten Medium geben die Resultierenden des einfallenden und des reflektierten Strahles ganz analoge Erscheinungen. Die Tabelle I ist über der Tabelle II gezeichnet zu denken. Hier bilden die Kraftlinien geschlossene (schwach ausgezogene) Kurven, welche ohne ihre Gestalt zu ändern sich in der Richtung $+X$ bewegen. Die Energie pendelt in der Richtung Z, bildet also eine stehende Welle, indem sie in der Richtung $+X$ periodisch vortschreitet.

Wegen der Grenzbedingungen erleiden die elektrischen Kraftlinien an der Grenze auch bei der Totalreflexion eine Brechung (wegen $\mu_1=\mu_2$ tuen es die magnetischen Kraftlinien nicht) und gehen teilweise in das zweite Medium hinein (Tabelle II). Gleichzeitig tritt in das zweite Medium auch Energie ein, aber an verschiedenen Stellen der Grenzebene zu verschiedenen Zeiten.

Die Energie oder der Lichtstrahl, welcher an irgend einer Stelle in das zweite Medium hineintritt, ist nur auf einer unbeträchtlichen Tiefe unter der Grenzebene bemerkbar, denn er beschreibt eine krumme Linie um sofort, aber an einer anderen Stelle, in das erste Medium wieder zurückzukehren. So erscheint der Strahl im ersten Medium totalreflektiert.

Die Tabellen I und II geben über den ganzen Vorgang ein klares Bild.

Januar 1908. *A. Eichenwald.*



$-\frac{3}{4}\lambda_z$
$-\frac{1}{2}\lambda_z$
$-\frac{1}{4}\lambda_z$
z
$\frac{1}{4}\lambda_x$
$\frac{1}{2}\lambda_x$
$\frac{3}{4}\lambda_x$
λ_x
x

Таблица I

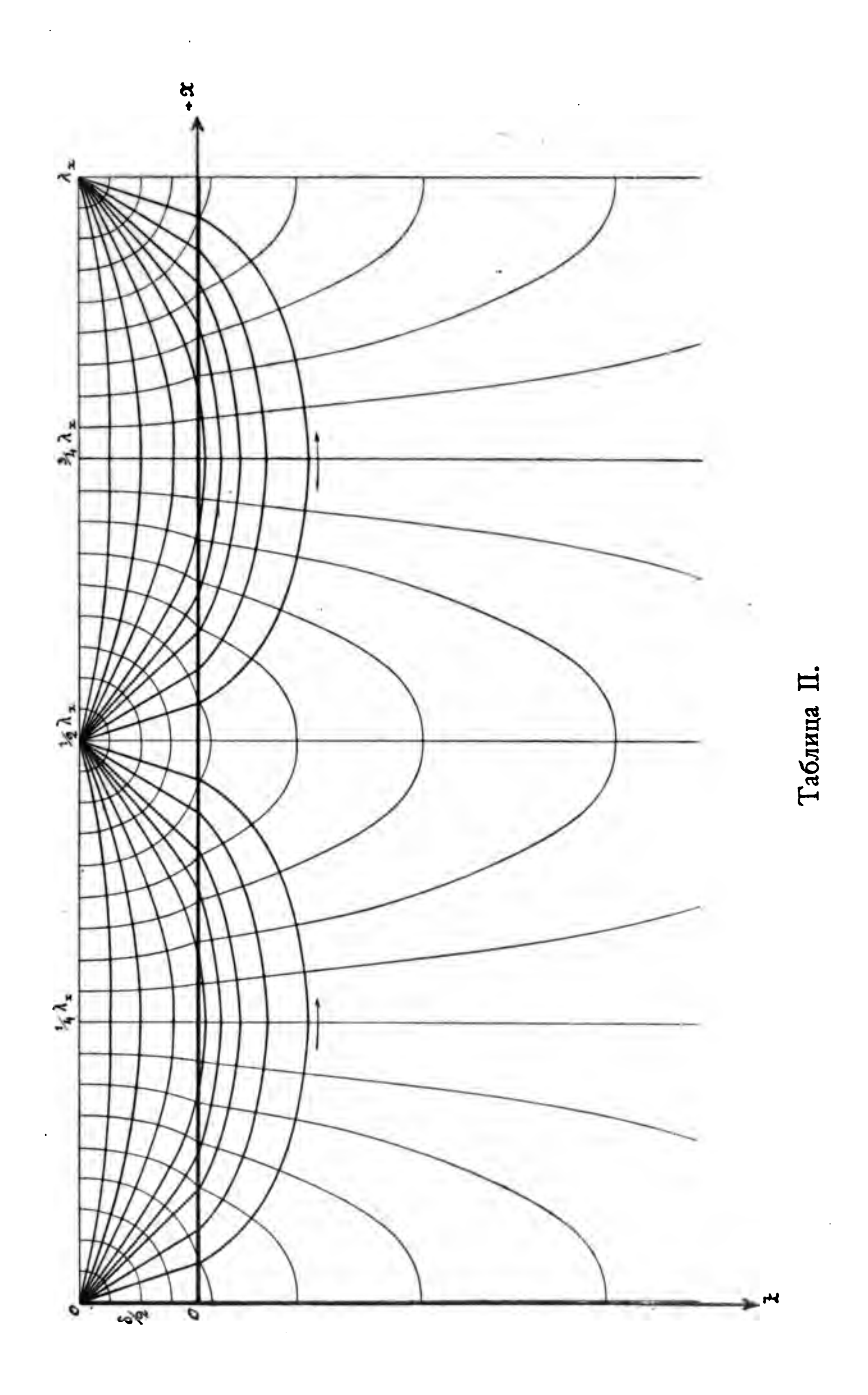
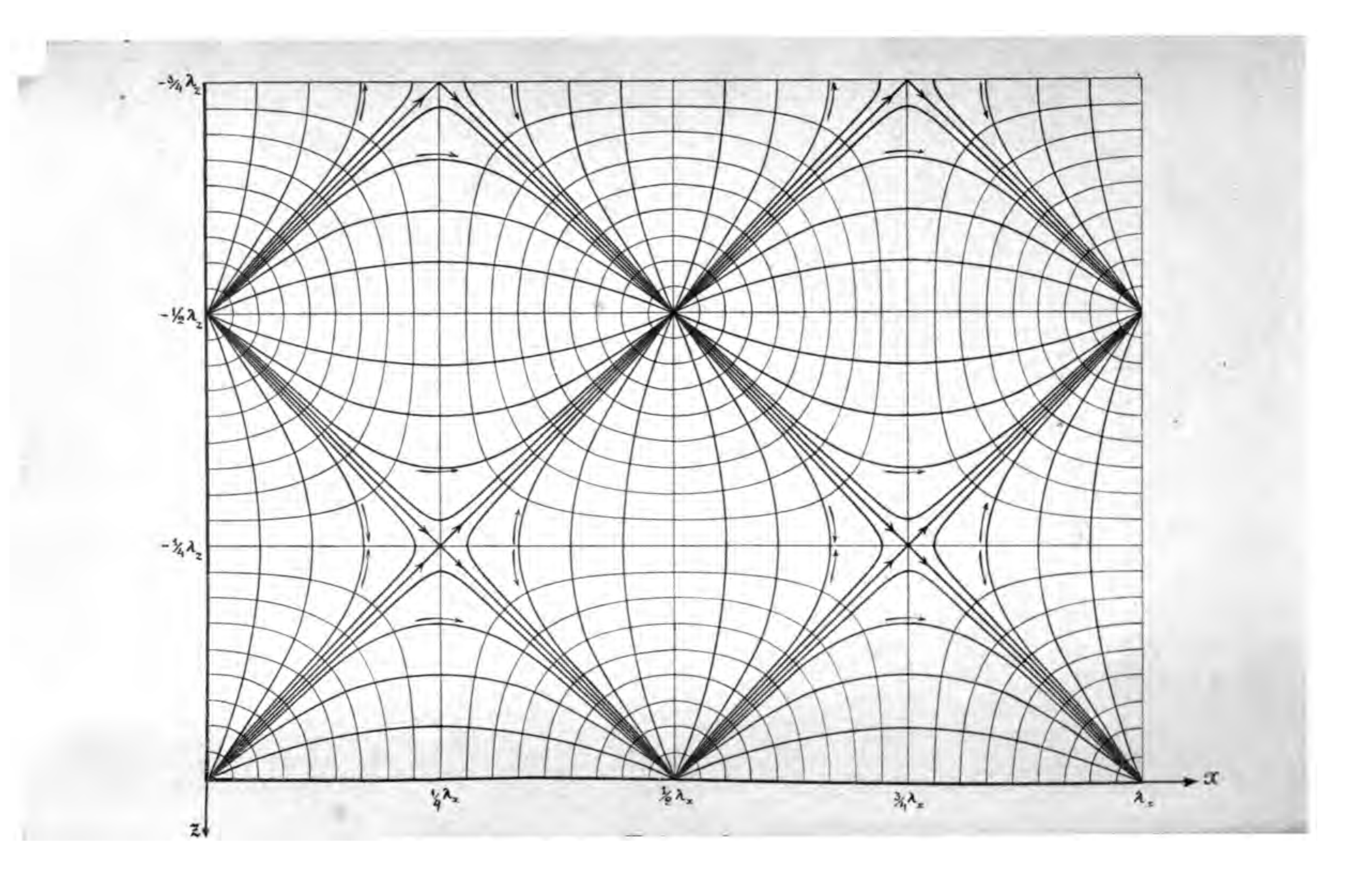


Таблица II.



$-\frac{3}{4}\lambda_z$
$-\frac{1}{2}\lambda_z$
$-\frac{1}{4}\lambda_z$
z
$\frac{1}{4}\lambda_x$
$\frac{1}{2}\lambda_x$
$\frac{3}{4}\lambda_x$
λ_x
x

Къ статьѣ А. А. Эйхенвальда.

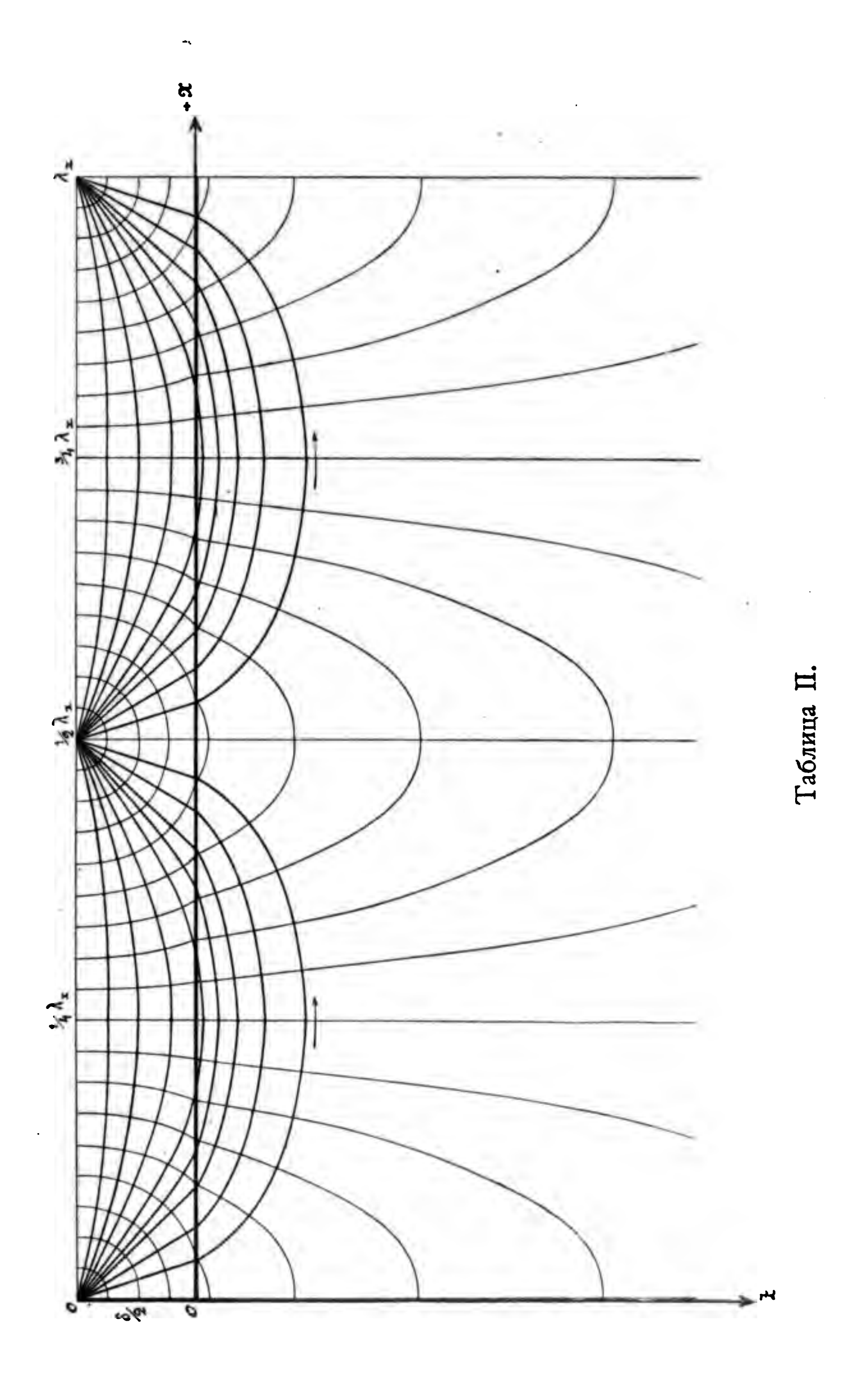


Таблица II.

Книгоиздательство „Современныя Проблемы“.

Эрнстъ Махъ
Профессоръ Вѣнскаго Университета.

Принципъ сохраненія энергіи.

Москва.
1909.

МОСКВА,
Типографія А. С. Забалуева Стрѣлецкій пер., д. № 4.
1909.

И. Гморчевский.

Книгоиздательство „Современныя Проблемы“.

Эрнстъ Махъ.
Профессоръ Вѣнскаго Университета.

Принципъ сохраненія энергіи.

Переводъ съ нѣмецкаго
І. Я. Ляховскаго.

Москва,
1909.

МОСКВА,
Типографія А. С. Забалуева Стрѣлецкій пер., д. № 4.
1909.

Послѣдующее изложеніе покажетъ, что *всѣ* затронутые нами моменты дѣйствительно содѣйствовали развитію спорнаго взгляда, но что при этомъ, кромѣ того, весьма существенную роль играла мало отмѣченная до сихъ поръ *логическая* и чисто *нормальная* потребность.

1. Принципъ исключеннаго perpetuum mobile.

Законъ сохраненія энергіи въ своей современной формѣ, хотя и не идентиченъ принципу исключеннаго perpetuum mobile, все же находится въ близкомъ отношеніи къ нему. Послѣдній принципъ однако вовсе не новъ, такъ какъ въ области механики уже въ теченіе столѣтій руководилъ онъ выдающимися мыслителями при ихъ изслѣдованіяхъ. Позволимъ себѣ подкрѣпить это историческими примѣрами:

S. Stevinus въ своихъ hypomncmata mathematica Tom IV de statica. Leyden 1605 p. 35. занимается изученіемъ равновѣсія на наклонной плоскости.

На трехгранной призмѣ ABC (представленной на рис. 1 въ разрѣзѣ), одна грань которой AB горизонтальна, виситъ непрерывный шнуръ съ усаженными на немъ на одинаковомъ разстояніи другъ отъ друга 14-тью шарами одинаковаго вѣса. Такъ какъ нижнюю симметрическую часть шнура ADC можно мысленно отбросить, то Стевинъ дѣлаетъ заключеніе, что четыре шара на AB удерживаютъ въ равновѣсіи два шара на AC. Если бы это равновѣсіе было на моментъ нарушено, то оно уже никогда не могло бы быть возстановлено, и шнуръ долженъ былъ бы постоянно вращаться въ одномъ направленіи, и мы имѣли бы perpetuum mobile.

Рис. 1.

„Допустивъ это рядъ шаровъ, или цѣпь сохраняла быодно и то же положеніе, и на томъ же самомъ основаніи вѣсъ 8 шаровъ съ лѣвой стороны былъ бы выше вѣса 6 шаровъ съ правой стороны; поэтому эти 8 лѣвыхъ шаровъ опять опустились бы, а 6 правыхъ поднялись и т. д., и эти

шары сами по себѣ обусловливали бы движеніе, что невѣрно" [1]).

Отсюда Стевинъ легко выводитъ законы равновѣсія на наклонной плоскости и еще много другихъ плодотворныхъ заключеній.

Въ отдѣлѣ гидростатики того же сочиненія (стр. 114) Стевинъ выставляетъ слѣдующее положеніе:

„Данная масса воды сохраняетъ данное ей мѣсто внутри воды" [2]).

Это положеніе доказывается на рис. 2 слѣдующимъ образомъ:

„Итакъ пусть A (если это могло бы какимъ-нибудь естественнымъ образомъ случиться) не сохраняетъ своего положенія, а падаетъ по направленію къ D; допустивъ это, вслѣдъ за A по той же причинѣ опустится къ D сосѣдняя съ A часть воды: послѣдняя будетъ въ свою очередь вытѣснена другой частью; такимъ образомъ эта вода (такъ какъ та же причина продолжаетъ существовать) пріобрѣтаетъ постоянное движеніе, что было бы абсурдомъ" [3]).

A

D

Рис. 2.

Отсюда выводятся всѣ законы гидростатики. При этомъ Стевинъ впервые развиваетъ столь плодотворную для современной аналитической механики мысль, согласно которой равновѣсіе какой-нибудь системы не нарушается отъ присоединенія прочныхъ соединеній. Извѣстно, напримѣръ, что принципъ сохраненія центра тяжести выводится теперь изъ принципа Даламбера съ помощью вышеуказаннаго замѣчанія.

Если бы мы вздумали теперь воспроизвести опытъ Стевина, то мы должны были бы, правда, нѣсколько измѣнить

---

1) „Atqui hoc si sit, globorum series sive corona eundem situm cum priore habebit, eademque de causa octo globi sinistri ponderosiores erunt sex dextris, ideoque rursus octo illi descedent, sex illi ascendent, istique globi ex sese continuum et aeternum motum efficient, quod est falsum".

2) „Aquam datam, datum sibi intra aquam locum servare".

3) „A igitur, (si ullo modo per naturam fieri possit) locum sibi tributum non servato, ac delabatur in D; quibus positis aqua quae ipsi A succedit eandem ob causam deffluet in D, eademque ab alia instinc expelletur, atque adeo aqua haec (cum ubique eadem ratio sit) motum instituet perpetuum, quod absurdum fuerit".

умѣли этимъ воспользоваться, они легко замѣтили бы свои ошибки и поняли бы, что достичь этого механическимъ путемъ немыслимо“ [1]).

Іезуитское reservatio mentalis можно еще, быть-можетъ, усмотрѣть въ словахъ „механическимъ путемъ“. Изъ этого можно было бы вывести, что Гейгенсъ *не* механическое perpetuum mobile считаетъ возможнымъ.

Еще яснѣе выражено обобщеніе галилеевскаго принципа въ Propos. IV того же отдѣла:

„Если какой либо маятникъ, состоящій изъ многихъ тяжелыхъ тѣлъ, будучи выведены изъ состоянія покоя, совершитъ извѣстную часть колебанія, и мы затѣмъ вообразимъ, что, начиная съ этой точки, связи между различными частями этого маятника нарушатся, и каждое изъ тѣлъ подымется на максимальную высоту со своею скоростью, направленной кверху, то и общій центръ тяжести, поднимется, конечно до того уровня, на которомъ онъ находился въ началѣ движенія“ [2]).

Послѣдній принципъ, являющійся распространеніемъ закона на *систему* массъ, закона, выведеннаго Галилеемъ для *одной* массы, и представляющаго собою, по объясненію Гейгенса, не что иное, какъ принципы невозможности perpetuum mobile, послужилъ Гейгенсу основаніемъ теоріи центра качанія. Лагранжъ называетъ этотъ принципъ сомнительнымъ и радуется тому, что Якову Бернулли (1681) удалось привести теорію центра качанія къ законамъ рычага, которые казались ему яснѣе. Надъ этой проблемой бились почти всѣ

---

1) Horologii pars quarta. De centro oscillationis.

Si pondera quotlibet, vi gravitatis suae, moveri incipiant; non posse centrum gravitatis ex ipsis compositae altius, quam ubi incipiente motu reperiebatur, ascendere.

Ipsa vero hypothesis nostra quominus scrupulam moveat, nihil aliud sibi velle ostendemus, quam quod nemo unquom negavit, gravia nemque sursum non ferri.—Et sane, si hac eadem uti scirent novorum operum machinatores, qui motum perpetuum irrito conatu moliuntur, facile suos ipsi errores deprehenderent, intelligerentque rem eam mechanica ratione haud quaquam possibelem esse.

2) Si pendulum, epluribus ponderibus compositum, atque e quite dimissum, partem quamcunque oscillationis integrae confecerit, atque inde porro intelligantur pondera ejus singula, relicto communi vinculo, celeritates acquisitas sursum convertere, ac quosque possunt ascendere; hoc facto centrum gravitatis ex omnibus compositae, ad eandem altitudinem reversum erit, quam ante inceptum oscillationem obtinebat.

шары сами по себѣ обусловливали бы движенiе, что невѣрно" [1]).

Отсюда Стевинъ легко выводитъ законы равновѣсія на наклонной плоскости и еще много другихъ плодотворныхъ заключеній.

Въ отдѣлѣ гидростатики того же сочиненія (стр. 114) Стевинъ выставляетъ слѣдующее положеніе:

„Данная масса воды сохраняетъ данное ей мѣсто внутри воды" [2]).

Это положеніе доказывается на рис. 2 слѣдующимъ образомъ:

„Итакъ пусть A (если это могло бы какимъ-нибудь естественнымъ образомъ случиться) не сохраняетъ своего положенія, а падаетъ по направленію къ D; допустивъ это, вслѣдъ за A по той же причинѣ опустится къ D сосѣдняя съ A часть воды: послѣдняя будетъ въ свою очередь вытѣснена другой частью; такимъ образомъ эта вода (такъ какъ та же причина продолжаетъ существовать) пріобрѣтаетъ постоянное движеніе, что было бы абсурдомъ" [3]).

A

D

Рис. 2.

Отсюда выводятся всѣ законы гидростатики. При этомъ Стевинъ впервые развиваетъ столь плодотворную для современной аналитической механики мысль, согласно которой равновѣсіе какой-нибудь системы не нарушается отъ присоединенія прочныхъ соединеній. Извѣстно, напримѣръ, что принципъ сохраненія центра тяжести выводится теперь изъ принципа Даламбера съ помощью вышеуказаннаго замѣчанія.

Если бы мы вздумали теперь воспроизвести опытъ Стевина, то мы должны были бы, правда, нѣсколько измѣнить

---

1) „Atqui hoc si sit, globorum series sive corona eundem situm cum priore habebit, eademque de causa octo globi sinistri ponderosiores erunt sex dextris, ideoque rursus octo illi descedent, sex illi ascendent, istique globi ex sese continuum et aeternum motum efficient, quod est falsum".

2) „Aquam datam, datum sibi intra aquam locum servare".

3) „A igitur, (si ullo modo per naturam fieri possit) locum sibi tributum non servato, ac delabatur in D; quibus positis aqua quae ipsi A succedit eandem ob causam deffluet in D, eademque ab alia instinc expelletur, atque adeo aqua haec (cum ubique eadem ratio sit) motum instituet perpetuum, quod absurdum fuerit".

его. Для насъ не представляетъ никакого затрудненія, отбросивъ мысленно сопротивленіе цѣпи, вообразить ее себѣ въ состояніи безконечнаго равномѣрнаго движенія по призмѣ Стевина Но мы стали бы протестовать противъ допущенія ускореннаго движенія или также противъ возможности равномѣрнаго движенія, если сопротивленія не устранены. Для большей ясности доказательства можно было бы также допустить замѣну цѣпи шаровъ тяжелымъ ровнымъ идеально гибкимъ шнуромъ.

Это ничего не измѣняетъ въ исторической цѣнности стевиновскихъ разсужденій. Должно быть признано фактомъ то, что Стевинъ изъ принципа невозможности perpetuum mobile выводитъ, повидимому, болѣе простыя истины.

Въ ходѣ мыслей, который привелъ Галилея къ его открытіямъ, значительную роль играло то положеніе, что тѣло, благодаря пріобрѣтенной при паденіи скорости, можетъ подняться на такую высоту, съ которой оно упало. Это положеніе, часто и вполнѣ ясно высказываемое Галилеемъ, есть лишь другая форма принципа исключеннаго perpetuum mobile, какъ это мы увидимъ у Гейгенса.

Извѣстно, что Галилей умозрительно открылъ законъ равномѣрно-ускореннаго движенія при паденіи, и призналъ его „наиболѣе простымъ и естественнымъ". При этомъ Галилею пришлось отказаться отъ другого закона, который былъ раньше установленъ имъ относительно того же явленія.

Для провѣрки же своего закона паденія онъ произвелъ опыты надъ паденіемъ по наклонной плоскости, при чемъ время паденія онъ измѣрялъ тяжестью воды, вытекавшей изъ сосуда тонкой струей. При этомъ онъ принимаетъ какъ основной законъ то, что скорость тѣла, пріобрѣтенная при движеніи по наклонной плоскости, всегда соотвѣтствуетъ высотѣ паденія по вертикальному направленію; это, по его мнѣнію, вытекаетъ изъ того, что тѣло, спустившееся по наклонной плоскости, можетъ подняться, благодаря своей скорости, по другой какъ угодно наклоненной плоскости, лишь на высоту, равную высотѣ первоначальнаго направленія, взятой по *вертикалу*. *Положеніе* о высотѣ поднятія привело его, *повидимому, къ закону* инерціи.

Такимъ образомъ вся механика покоится на одной мысли, которая, хотя и не возбуждаетъ сомнѣнія, но кажется и не однородной съ остальными основными положеніями и аксіомами математики. Каждый, занимающійся механикой, испытываетъ однажды неудобство такого положенія, каждый желаетъ устранить его, но рѣдко кто говоритъ объ этомъ. И поэтому вдумчивый новичекъ въ наукѣ испытываетъ большое удовольствіе, когда находитъ у такого авторитета, какъ Пуансо, въ его „théorie général de l'équilibre et du mouvement des systemes“ слѣдующее мѣсто, трактующее о взглядахъ автора на аналитическую механику:

„Такъ какъ въ этомъ трудѣ съ самаго начала предполагалось только ознакомленіе съ прекраснымъ развитіемъ механики, которая, казалось, вытекала изъ *одной* формулы, то вполнѣ естественно было думать, что наука уже закончена и остается лишь доказать принципъ скрытыхъ скоростей. Но эти изслѣдованія вернули назадъ всѣ тѣ трудности, которыя какъ разъ устранялись этимъ принципомъ. Этотъ общій законъ, который загромаждается расплывчатыми идеями о безконечно малыхъ движеніяхъ и нарушеніяхъ равновѣсія, какъ бы затемняется при ближайшемъ разсмотрѣніи; и такъ какъ книга Лагранжа была ясна только въ томъ, что касалось правильности вычисленія, то вскорѣ пришлось убѣдиться, что облако, скрывавшее развитіе самихъ принциповъ, лишь потому казалось разсѣяннымъ, что оно какъ бы заволакиволо исходные точки этой науки“.

„Общее доказательство принципа скрытыхъ движеній сводится собственно къ перестройкѣ всей механики на другомъ базисѣ: ибо доказательство закона, который охватываетъ всю науку, не можетъ быть ничѣмъ инымъ, какъ сведеніемъ этой науки къ другому закону, такому же общему, но болѣе ясному, или, по крайней мѣрѣ, болѣе простому; послѣдній законъ дѣлаетъ такимъ образомъ излишнимъ первый законъ.

Доказать принципъ скрытыхъ движеній значитъ, по мнѣнію Пуансо, перестроить заново всю механику.

Другое непріятное для математиковъ обстоятельство заключается въ томъ, что въ настоящее время положеніе меха-

ники таково, что динамика основывается на статикѣ, между тѣмъ какъ было бы желательно, чтобы въ наукѣ, претендующей на дедуктивную законченность, болѣе частныя положенія статики съ легкостью выводились изъ болѣе общихъ динамическихъ.

Это желаніе выражаетъ также великій ученый, именно Гауссъ, устанавливая свой принципъ наименьшаго принужденія (Crelles Journal т. IV стр. 233), въ слѣдующихъ словахъ: „Если и въ порядкѣ вещей то обстоятельство, что при постепенномъ развитіи науки и при обученіи индивидуума легкое предшествуетъ трудному, простое запутанному, исключительное обычному, то все же духъ человѣческій, достигнувъ однажды высокой точки зрѣнія, требуетъ обратнаго движенія, при которомъ вся статика представится лишь какъ частный случай механики". Принципъ Гаусса во всякомъ случаѣ общій принципъ, жаль только, что въ немъ нельзя непосредственно убѣдиться, и что Гауссъ выводитъ его при помощи принципа Даламбера, благодаря чему все остается опять по старому.

Откуда возникаетъ эта своеобразная роль, которую играетъ въ механикѣ принципъ скрытаго движенія? На этотъ вопросъ я ограничусь пока лишь слѣдующимъ отвѣтомъ. Не безъ труда возможно описать разницу впечатлѣній, которое произвело на меня лагранжевское доказательство этого принципа, когда я впервые, будучи еще студентомъ, познакомился съ нимъ, и затѣмъ когда я, послѣ занятій исторіей, снова углубился въ него. Это доказательство показалось мнѣ раньше нелѣпымъ, именно благодаря своимъ блокамъ и шнурамъ, которые не укладывались въ мое математическое мышленіе, и дѣйствіе которыхъ я охотнѣе хотѣлъ бы вывести изъ самого принципа, чѣмъ заранѣе признать это дѣйствіе извѣстнымъ. Дѣйствительно, черезъ всю механику проходитъ принципъ исключеннаго perpetuum mobile, который выполняетъ почти все то, что не нравится Лагранжу, и чѣмъ онъ самъ тѣмъ не менѣе принужденъ былъ пользоваться, хотя бы и въ скрытой формѣ. Если этому принципу мы укажемъ соотвѣтствующее мѣсто и придадимъ ему правильное толкованіе, то парадоксальность его исчезнетъ.

мѣнно закрѣпленной, если только причина новаго ускорені или замедленія устранена: объ ускореніи я говорю тогда когда тѣло продолжаетъ двигаться впередъ по продолженно наклонной плоскости; о замедленіи же, когда тѣло направляется по наклонной плоскости BC вверхъ; на горизонтальной же линіи GH равномѣрное движеніе будетъ существоват до безконечности, сохраняя ту скорость, которое оно пріобрѣл при своемъ движеніи отъ A до B" [1]).

Гейгенсъ, являющійся во всемъ послѣдователемъ Галилея, формулируетъ законъ инерціи строже и обобщаетъ стол плодотворный въ рукахъ Галилея законъ высоты поднятія Этимъ закономъ пользуется онъ для рѣшенія проблемы центрѣ колебаній и высказывается при этомъ вполнѣ яск о томъ, что положеніе о высотѣ поднятія идентично принцип исключеннаго perpetuum mobile.

Приведемъ важнѣйшія мѣста изъ сочиненія Гейгенса— Horologium, часть 2, Гипотезы.

„Если бы не существовало тяжести и если бы во: духъ не препятствовалъ движенію тѣлъ, то каждое изъ них продолжало бы разъ начатое движеніе съ постоянной скоро тью по направленію прямой линіи [2])

Horologium. 4-ая часть. О центрѣ колебанія.

Если тѣла любого вѣса вслѣдствіе своей тяжести пр ходятъ въ движеніе, то ихъ общій центръ колебанія не м жетъ подняться выше того, чѣмъ онъ находился вначалѣ"

„Мы покажемъ, что эта предпосылка, хотя она и м жетъ показаться сомнительной, устанавливаетъ не что ино какъ то, въ чемъ никто никогда не сомнѣвался, именно т что тяжелыя тѣла не могутъ (сами собой) подниматьс вверхъ. — И если бы изобрѣтатели новыхъ машинъ, напрас разыскивающіе способы осуществленія perpetuum mobil

---

[1]) Constat jam, quod mobile ex quiete in A descendes per AB, grad acquirit velocitatis iuxta temporis ipsius incrementum: gradum vero in B e maximum acquisitorum, et suapte natura imutabiliter impressum, sublatis sc cet causis accelerationis novae, aut retardationis: accelerationis inquam, si adh super extenso plano ulterius progrederetur; retardationis vero, dum super p num acclive BC fit reflexio: in horizontali autem GH aequabilis motus iu gradum velocitatis ex A in B acquisitae in infinitum estenderetur.

[2]) Si gravitas non esset, neque aer motui corporum officeret, unumquodq *eorum, acceptum semel* motum continuaturum velocitate aequabili, secundum *neam rectam.*

процессовъ, допустимъ, можетъ быть, въ примѣненіи къ теплотѣ или электричеству; но развѣ можно явленія теплоты или электричества разсматривать иначе, какъ движеніе извѣстныхъ тѣлъ, и не должны ли эти явленія, какъ таковые, подчиняться общимъ законамъ механики?

Эти примѣры, которые посредствомъ цитатъ изъ трудовъ новѣйшаго времени могли бы быть продолжены до безконечности, показываютъ, что дѣйствительно существуетъ стремленіе объяснить все при помощи механики. И это стремленіе вполнѣ объяснимо. Механическіе процессы, какъ простыя движенія, ограниченныя пространствомъ и временемъ, *наиболѣе доступны* наблюденію и изслѣдованію при помощи нашихъ въ высшей степени организованныхъ органовъ чувствъ. Механическіе процессы мы почти безъ всякаго труда воспроизводимъ въ нашемъ воображеніи. Давленіе, какъ обстоятельство, приводящее въ движеніе, намъ хорошо извѣстно изъ повседневнаго опыта. Всѣ измѣненія, которыя лично вызываетъ вокругъ себя отдѣльный человѣкъ, или человѣчество въ области техники, соединены между собой посредствомъ движенія. Итакъ, чѣмъ другимъ можетъ намъ представиться движеніе, какъ не важнѣйшимъ физическимъ факторомъ?

И во всѣхъ физическихъ процессахъ удается открыть *механическія* свойства. Звучащій колоколъ дрожитъ, раскаленныя тѣла растягиваются, электрическія тѣла притягиваютъ другъ друга. Почему же не попытаться намъ разсмотрѣть всѣ явленія съ механической стороны, стороны наиболѣе удобной и доступной для наблюденія и измѣренія? Нельзя также ничего возразить противъ попытки пояснить механическія свойства физическихъ процессовъ посредствомъ *механическихъ аналогій*.

Современная же физика въ этомъ направленіи ушла во всякомъ случаѣ *очень далеко* Точка зрѣнія, установленная Вундтомъ въ его очень интересномъ трудѣ „о физическихъ аксіомахъ", раздѣляется большинствомъ физиковъ:

Вунтдъ приводитъ слѣдующія аксіомы:

1. Всѣ причины въ природѣ суть причины движенія.

2. Всякая причина движенія лежитъ внѣ движимаго.

3. Всѣ причины движенія дѣйствуютъ по направленію прямой линіи соединенія.

4. Дѣйствіе всякой причины остается.

5. Каждому дѣйствію соотвѣтствуетъ равное противодѣйствіе.

6. Всякое дѣйствіе эквивалентно причинѣ.

Съ этими положеніями можно согласиться, какъ съ основными положеніями *механики*. Но если послѣднія выставляются какъ аксіомы физики, то получается собственно отрицаніе всѣхъ процессовъ за исключеніемъ движенія. Всѣ измѣненія въ природѣ, по Вундту, суть лишь перемѣны мѣстъ, всякая же причина есть причина движенія (см. стр. 26 указан. сочиненія). Если мы вникнемъ въ философское обоснованіе, которое придаетъ своему воззрѣнію Вундтъ, то это заведетъ насъ далеко въ разсужденія элеатовъ и гербартіанцевъ. Перемѣна мѣста, думаетъ Вундтъ, является *единственнымъ* измѣненіемъ вещей, при которомъ послѣднія остаются идентичными. Если же вещи измѣняются *качественно*, то мы должны скорѣе представить себѣ, что одна вещь исчезаетъ а другая возникаетъ, что несовмѣстимо съ представленіемъ объ идентичности наблюденной сущности и о неразрушаемости матеріи. Вспомнимъ только, что элеаты находили такого же рода затрудненія при разсмотрѣніи. Нельзя же допустить, что одна вещь, исчезая на одномъ мѣстѣ, возникаетъ на другомъ безъ измѣненія?

Развѣ по существу дѣла мы знаемъ *больше* о томъ, почему тѣло, оставляя *одно мѣсто* возникаетъ на *другомъ*, чѣмъ то, какимъ образомъ *холодное* тѣло становится *горячимъ?* Допустимъ, что мы *вполнѣ постигли* механическіе процессы; могли бы мы и должны ли бы мы тогда *устранить изъ міра* другіе процессы, которыхъ мы не понимаемъ? Согласно этому воззрѣнію было бы дѣйствительно самымъ простымъ отрицать существованіе всего міра. Элеаты, собственно, дошли до этого, гербартіанцы же были недалеко отъ этой цѣли.

Съ этой точки зрѣнія физика представитъ намъ такую схему, по которой мы врядъ ли узнаемъ дѣйствительный міръ. Въ самомъ дѣлѣ для людей, которые годами углублялись въ эту идею, *міръ ощущеній*, къ которому они раньше

относились какъ чему то весьма знакомому, окажется вдругъ величайшей „мiровой загадкой".

Какъ бы ни было понятно стремленiе свести всѣ физическiе процессы къ „движенiю атомовъ", но все же нужно сказать, что этотъ идеалъ является химерой. Послѣднiй не разъ служилъ эффектной программой популярныхъ лекцiй. Для трудовъ же серiозныхъ испытателей врядъ ли имѣло оно какое либо существенное значенiе.

Что дѣйствительно было сдѣлано въ области механической физики, заключается либо въ объясненiи физическихъ процессовъ посредствомъ болѣе обычныхъ для насъ *механическихъ аналогiй*, какъ въ теорiяхъ свѣта и электричества, либо въ *точномъ количественномъ* распознованiи связи механическихъ процессовъ съ другими физическими процессами, какъ въ термодинамикѣ.

3. Принципъ сохраненiя энергiи въ физикѣ.

Только *опытъ* можетъ уяснить намъ то, что другiе физическiе измѣненiя обусловлены механическими процессами, и наоборотъ. Благодаря изобрѣтенiю паровой машины и ея техническаго значенiя впервые было обращено вниманiе на связь механическихъ процессовъ (въ особенности способности производить работу) съ измѣненiемъ состоянiя теплоты. Интересы техники соединились въ головѣ С. Карно съ потребностью научной ясности, и привели къ замѣчательнымъ выводамъ, результатомъ которыхъ является термодинамика. Лишь исторической случайностью объясняется то обстоятельство, что эти логическiе выводы не находятся въ тѣсной связи съ электротехникой.

При изслѣдованiяхъ того, *какой* максимумъ *работы* при опредѣленномъ потребленiи горючей *теплоты* можетъ воспроизвести калорическая машина и паровая въ особенности, Карно руководился механическими аналогiями. Тѣло можетъ воспроизводить работу, если оно, нагрѣваясь подъ давленiемъ, растягивается. Къ тому же оно должно получить тепло отъ *болѣе теплаго* тѣла. Такимъ образомъ для того, чтобы теплота воспроизводила работы, она должна

перейти отъ болѣе теплаго къ менѣе теплому тѣлу, подобно тому какъ вода, чтобы привести въ движеніе мельницу, должна упасть съ болѣе высокаго уровня на низкій. Разницы температуръ такимъ образомъ представляютъ собою силы, производящія работу, подобно тому, какъ разница уровней на которыхъ находятся тяжелыя тѣла.

Карно представляетъ себѣ мысленно *идеальный* процессъ, при которомъ никакая часть теплоты не пропадаетъ безъ пользы (безъ произведенія работы). Въ результатѣ этого процесса такимъ образомъ получается при данной затратѣ теплоты maximum работы. Примѣрамъ можетъ послужить мельничное колесо, черпающее съ болѣе высокаго уровня воду, которая вся до послѣдней капли очень медленно спускается по тому же колесу на болѣе низкій уровень. Особенность процесса заключается въ томъ, что вода, при затратѣ той же работы, можетъ быть доставлена на произвольную высоту. Это свойство *обратимости* процесса подходитъ и къ процессу Карно. Послѣдній можетъ также при затратѣ той же работы сдѣлаться обратимымъ процессомъ и благодаря этому поднять температу (теплоту) до первоначальнаго уровня.

Если мы допустимъ существованіе такого рода *двухъ* процессовъ А и В, что въ А количество теплоты при пониженіи температуры съ t_1 до t_2 производитъ работу W, а въ В при тѣхъ же обстоятельствахъ получается *большая* работа $W+W_1$, то можно было бы соединить въ *одинъ* процессъ А и В, дѣйствующіе въ противоположныхъ направленіяхъ. При этомъ А сдѣлался бы, благодаря произведенному В измѣненію въ теплотѣ, обратимымъ процессомъ и далъ бы результаты, такъ сказать, изъ ничего полученную прибавочную работу. Такая комбинація представляла бы собою perpetuum mobile.

Сознавая, какъ неважно то обстоятельство, проявляются ли механическіе законы непосредственно или косвеннымъ путемъ (посредствомъ явленій теплоты), и будучи вполнѣ убѣжденъ во *всеобщей* закономѣрной связи въ природѣ, Карно впервые исключаетъ здѣсь изъ области *общей* физики perpetuum mobile. *Но тогда величина работы w, которая можетъ*

быть получена вслѣдствіе перехода количества теплоты Q съ t_1 на t_2, можетъ зависѣть отъ природы веществъ и отъ рода процесса (насколько послѣдній свободенъ отъ потерь), а не отъ температуръ t_1 и t.

Это важное положеніе было вполнѣ подтверждено спеціальными изслѣдованіями самого Карно (1824), Клапейрона (1834) и Вилльяма Томсона (1849). Послѣднее установлено *независимо отъ какого-либо взгляда на природу* теплоты благодаря исключенію perpetuum mobile. Во всякомъ случаѣ Карно удержалъ взглядъ Блэха, согласно которому *общее каличество теплоты остается неизмѣннымъ.*

Положеніе Карно привело къ замѣчательнѣйшимъ выводамъ. В. Томсонъ (1848) основалъ на немъ геніальную мысль объ *абсолютной* (общесравнимой) температурной скалѣ, а Джемсъ Томсонъ (1849) представилъ себѣ процессъ Карно въ видѣ воды, которая, замерзая подъ давленіемъ, производитъ работу. При этомъ онъ установилъ, что при давленіи въ одну атмосферу точка замерзанія понижается на 0,0075° по Цельсію. Объ этомъ я упоминаю только для примѣра.

Спустя 20 лѣтъ послѣ опубликованіи работы Карно, І. Р. Майеръ и І. П. Джоулъ подвинули этотъ вопросъ впередъ. Майеръ, состая въ качествѣ врача на голландской службѣ на Явѣ, наблюдалъ при кровопусканіяхъ поразительную яркость окраски венозной крови. Этотъ фактъ поставилъ онъ, согласно либиговской теоріи животной теплоты, въ связь съ незначительной потерей тепла въ жаркомъ климатѣ, а также съ незначительной тратой горючаго органическаго матеріала. Вся теплоотдача находящагося въ покоѣ человѣка должна соотвѣтствовать общей теплотѣ горѣнія. Но такъ какъ *всѣ* органическія функціи, включая и *механическія*, должны быть отнесены на счетъ теплоты горѣнія, то должна и существовать извѣстная зависимость между *механической* функціей и *затратой теплоты.*

Джоулъ исходилъ отъ совершенно подобныхъ же разсужденій относительно гальванической батареи. Теплота реакціи ложетъ проявиться въ гальванической парѣ въ количествѣ, оотвѣтствующемъ затратѣ цинка. Затѣмъ, при возникновеніи ока, часть этой теплоты вновь освобождается въ проводникѣ

3. Всѣ причины движенія дѣйствуютъ по направленію прямой линіи соединенія.

4. Дѣйствіе всякой причины остается.

5. Каждому дѣйствію соотвѣтствуетъ равное противодѣйствіе.

6. Всякое дѣйствіе эквивалентно причинѣ.

Съ этими положеніями можно согласиться, какъ съ основными положеніями *механики*. Но если послѣднія выставляются какъ аксіомы физики, то получается собственно отрицаніе всѣхъ процессовъ за исключеніемъ движенія. Всѣ измѣненія въ природѣ, по Вундту, суть лишь перемѣны мѣстъ, всякая же причина есть причина движенія (см. стр. 26 указан. сочиненія). Если мы вникнемъ въ философское обоснованіе, которое придаетъ своему воззрѣнію Вундтъ, то это заведетъ насъ далеко въ разсужденія элеатовъ и гербартіанцевъ. Перемѣна мѣста, думаетъ Вундтъ, является *единственнымъ* измѣненіемъ вещей, при которомъ послѣднія остаются идентичными. Если же вещи измѣняются *качественно*, то мы должны скорѣе представить себѣ, что одна вещь исчезаетъ а другая возникаетъ, что несовмѣстимо съ представленіемъ объ идентичности наблюденной сущности и о неразрушаемости матеріи. Вспомнимъ только, что элеаты находили такого же рода затрудненія при разсмотрѣніи. Нельзя же допустить, что одна вещь, исчезая на одномъ мѣстѣ, возникаетъ на другомъ безъ измѣненія?

Развѣ по существу дѣла мы знаемъ *больше* о томъ, почему тѣло, оставляя *одно мѣсто* возникаетъ на *другомъ*, чѣмъ то, какимъ образомъ *холодное* тѣло становится *горячимъ?* Допустимъ, что мы *вполнѣ постигли* механическіе процессы; могли бы мы и должны ли бы мы тогда *устранить изъ міра* другіе процессы, которыхъ мы не понимаемъ? Согласно этому воззрѣнію было бы дѣйствительно самымъ простымъ отрицать существованіе всего міра. Элеаты, собственно, дошли до этого, гербартіанцы же были недалеко отъ этой цѣли.

Съ этой точки зрѣнія физика представитъ намъ такую схему, по которой мы врядъ ли узнаемъ дѣйствительный міръ. Въ самомъ дѣлѣ для людей, которые годами углублялись въ эту идею, *міръ ощущеній*, къ которому они раньше

Послѣ того, какъ было доказано, что *теплота должна исчезнуть*, чтобы на счетъ ея была произведена *механическая работа*, *положеніе Карно не могло уже болѣе считаться совершенной формулировкой фактовъ*. Этому положенію законченность придалъ впервые Клаузіусъ (1850) а въ (1851 г. къ нему присоединился Томсонъ. Принципъ гласитъ такъ: Если *количество теплоты* Q' при обратимомъ процессѣ превращается въ *работу*, то *другое* количество теплоты Q падаетъ съ абсолютной 1) температуры T^1 до абсолютной температуры T_2. При этомъ Q' зависитъ только отъ Q_1, T_1, T_2 и *не зависитъ* отъ примѣняемыхъ веществъ и отъ рода процесса (поскольку послѣдній вообще свободенъ отъ потерь). Въ виду послѣдняго обстоятельства достаточно опредѣлить такое отношеніе хотя бы для *одного* хорошо извѣстнаго въ физическомъ смыслѣ тѣла (напримѣръ, для газа) и для какого либо *одного* опредѣленнаго простого процесса; это отношеніе будетъ распространять тогда свое значеніе и на остальные случаи, этимъ путемъ находимъ мы:

$$\frac{Q'}{Q'+Q} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad . \; . \; . \; . \quad 1.)$$

т. е. частное отъ дѣленія превращенной въ работу (полезной) теплоты Q' и суммы превращенной и переведенной (всей истраченной) теплоты, которое и есть такъ-называемый *экономическій коэффиціентъ процесса*: $\dfrac{T_1 - T_2}{T_1}$

4. Представленія о теплотѣ.

Когда холодное тѣло приходитъ въ соприкосновеніе съ горячимъ, то мы замѣчамъ, что первое нагрѣвается, а послѣднее охлаждается. Можно сказать, что *одно* тѣло нагрѣвается *за счетъ другого*. Это уже приближается къ представленію о какомъ-то веществѣ, о *теплородѣ*, которое переходитъ изъ одного тѣла въ другое. Если двѣ массы воды m и m' не одинаковой температуры приходятъ во взаимное соприкосновеніе, то оказывается, что при быстромъ уравненіи темпера-

Подъ абсолютной температурой разумѣется температура въ 273°С. ниже точки замерзанія.

туръ ихъ обоюдныя измѣненія температуръ u и u' обратно пропорціональны массамъ и имѣютъ противоположные знаки, такъ что алгебраическая сумма произведеній есть.

$$m u + m' u' = 0.$$

Блэкъ назвалъ эти оба произведенія mu и $m'u'$, служащія основаніями для опредѣленія всего процесса, *количествами теплоты*, Послѣднія можно вмѣстѣ съ Блэкомъ *очень наглядно* представить, какъ мѣры количества вещества. *Существенное значеніе* имѣетъ однако не этотъ *образъ*, а неизмѣняемость вышеприведенной *суммы произведеній* при обыкновенныхъ явленіяхъ теплопроводности. Если гдѣ либо исчезаетъ какое нибудь количество теплоты, то вмѣсто него въ какомъ либо другомъ мѣстѣ возникаетъ ему равное. Это представленіе привело къ открытію удѣльной теплоты. Подъ конецъ признаетъ Блэкъ, что вмѣсто исчезнувшаго количества теплоты можетъ появиться и нѣчто другое, т. е. *растопленіе* или *испареніе* извѣстнаго количества вещества. Разрѣшая себѣ нѣкоторую вольность въ разсужденіяхъ, онъ еще сохраняетъ здѣсь излюбленное представленіе и разсматриваетъ исчезающее количество теплоты какъ еще существующее, но *скрытое*.

Весьма доступное для всѣхъ представленіе о *теплородѣ* было сильно поколеблено работами Майера и Джоула. Если количество теплоты можетъ быть *увиличиваемое* и *уменьшаемое*, то, по воззрѣніямъ того времени, теплота не можетъ быть *веществомъ*, а должна быть *движеніемъ*. Это побочное положеніе сдѣлалось много популярнѣе, чѣмъ все остальное ученіе объ энергіи. Все же мы можемъ убѣдиться, что современное *представленіе* о теплотѣ какъ *о движеніи* столь же несущественно, какъ и прежнее *представленіе о веществѣ*.

Оба эти представленія развивались или задерживались въ своемъ развитіи исключительно благодаря случайнымъ историческимъ обстоятельствамъ. Изъ того, что количеству теплоты соотвѣтствуетъ *механической* эквивалентъ, не слѣдуетъ еще, что теплота не вещество.

Это мы поясннмъ себѣ слѣдующимъ вопросомъ, который мнѣ иногда предлагали начинающіе. Существуетъ ли механическій эквивалентъ электричества, подобно механическому эквиваленту теплоты? Да и нѣтъ! Не существуетъ механиче-

скаго эквивалента количества электричества, подобнаго эквиваленту количества теплоты, такъ какъ одно и то же количество электричества имѣетъ очень разнообразную рабочую цѣнность, смотря по тому, при какихъ условіяхъ оно обнаруживается; но все же механическій эквивалентъ электричества существуетъ.

Прибавимъ къ этому еще одинъ вопросъ. Существуетъ ли механическій эквивалентъ воды? Эквивалента количества воды нѣтъ, но есть эквивалентъ вѣса воды, умноженнаго на высоту паденія.

Если лейденская банка разряжается и производитъ при этомъ работу, то мы не представляемъ себѣ, что количество электричества изчезаетъ, производя при этомъ работу, а скорѣе допускаемъ, что электричество переходитъ лишь въ другое положеніе, при чемъ равныя количества положительнаго и отрицательнаго электричества соединяются между собой.

Откуда происходитъ это различіе въ нашихъ представленіяхъ о теплотѣ и электричествѣ? Это различіе имѣетъ лишь историческія причины; оно вполнѣ условно, болѣе того, въ этихъ представленіяхъ по существу даже нѣтъ никакого различія. Позволю себѣ обосновать это.

Кулонъ (Coulomb) устроилъ въ 1785 г. свои крутильные вѣсы, благодаря имъ онъ получилъ возможность измѣрять отталкиваніе наэлектризованныхъ тѣлъ. Положимъ, что мы имѣемъ два маленькихъ шарика A и B, которые совершенно одинаково наэлектризованы. Послѣдніе при опредѣленномъ разстояніи r между ихъ центрами оттолкнутся другъ отъ друга съ опредѣленной силой p. Приведемъ въ соприкосновеніе съ B тѣло C, наэлектризуемъ ихъ одинаково и измѣримъ затѣмъ отталкиваніе B отъ A и C отъ A при томъ же разстояніи r. Сумма этихъ отталкиваній будетъ опять p. Такимъ образомъ при этихъ различныхъ условіяхъ одно явленіе сохранило прежнюю величину, именно отталкиваніе. Припишемъ это дѣйствіе какому-нибудь агенту, веществу, и мы придемъ тогда неизбѣжно къ заключенію о постоянствѣ послѣдняго.

Риссъ устроилъ въ 1838 г. свой электрическій воздушный термометръ. При помощи этого термометра можно измѣрить *количество теплоты*, получаемаго при разряженіи банки. По

въ видѣ теплоты Джоула. Если мы включимъ въ цѣпь аппаратъ для электролитическаго разложенія воды, то часть этой теплоты опять исчезнетъ; послѣдняя однако вновь появляется при сгораніи образовавшагося гремучаго газа. Если токъ приводитъ въ движеніе электромоторъ, то часть теплоты опять исчезаетъ, которая однако вновь появляется при поглащеніи работы треніемъ. Такимъ образомъ и Джоулу представляется какъ получаемая *теплота*, такъ и производимая *работа* связанными съ *тратой веществъ матеріи*. И Майеръ и Джоулъ не далеки отъ того, чтобы разсматривать *теплоту и работу* какъ однородныя величины, которыя находятся между собой въ такой связи, что постоянно то, что появляется въ *одной* формѣ, исчезаетъ въ *другой*. Изъ этого слѣдуетъ *субстанціальное* представленіе о теплотѣ и работѣ, а также, наконецъ, *субстанціальное представленіе объ энергіи вообще*. Также усматривается *энергія* и во всякой перемѣнѣ физическаго состоянія, уничтоженіе которой производитъ *работу* (или эквивалентную теплоту). Электрическій зарядъ, напримѣръ, есть энергія.

Майеръ, пользуясь общеизвѣстными еще въ его время физическими числовыми данными, вычислилъ (1842), что при *исчезновеніи одной киллограммокалоріи* можетъ быть *произведено 365 киллограммометровъ работы*, и наоборотъ. Джоулъ же, послѣ цѣлаго ряда болѣе искусныхъ и разнообразныхъ опытовъ, предпринятыхъ въ 1843 г., опредѣлилъ *механическій эквивалентъ киллограммокалоріи* подъ конецъ значительно точнѣе, именно въ *425 киллограммокалоріи*.

Если мы станемъ оцѣнивать всякое измѣненіе физическаго состоянія при помощи *механической работы*, которая можетъ быть произведена при исчезновеніи послѣдней, и если эту мѣру назовемъ *энергіей*, то *всѣ* физическія измѣненія состоянія, какъ бы разнородны они ни были, можно будетъ измѣрять при помощи одной и той же мѣры и сказать: *Сумма всѣхъ энергій остается постоянной*. Это есть та форма, въ которую, въ разработкѣ Майера, Джоула, Гельмгольца и В. Томсона, вылился принципъ исключеннаго perpetuum mobili, при своемъ распространеніи на всю физику.

Послѣ того, какъ было доказано, что *теплота должна исчезнуть*, чтобы на счетъ ея была произведена *механическая работа*, *положеніе Карно не могло уже болѣе считаться совершенной формулировкой фактовъ*. Этому положенію законченность придалъ впервые Клаузіусъ (1850) а въ (1851 г. къ нему присоединился Томсонъ. Принципъ гласитъ такъ: Если *количество теплоты* Q' при обратимомъ процессѣ превращается въ *работу*, то *другое* количество теплоты Q падаетъ съ абсолютной [1]) температуры T^1 до абсолютной температуры T_2. При этомъ Q' зависитъ только отъ Q_1, T_1, T_2 и *не зависитъ* отъ примѣняемыхъ веществъ и отъ рода процесса (поскольку послѣдній вообще свободенъ отъ потерь). Въ виду послѣдняго обстоятельства достаточно опредѣлить такое отношеніе хотя бы для *одного* хорошо извѣстнаго въ физическомъ смыслѣ тѣла (напримѣръ, для газа) и для какого либо *одного* опредѣленнаго простого процесса; это отношеніе будетъ распространять тогда свое значеніе и на остальные случаи, этимъ путемъ находимъ мы:

$$\frac{Q'}{Q'+Q}=\frac{T_1-T_2}{T_1} \quad . \; . \; . \; . \quad 1.)$$

т. е. частное отъ дѣленія превращенной въ работу (полезной) теплоты Q' и суммы превращенной и переведенной (всей истраченной) теплоты, которое и есть такъ-называемый *экономическій коэффиціентъ процесса*: $\frac{T_1-T_2}{T_1}$

4. Представленія о теплотѣ.

Когда холодное тѣло приходитъ въ соприкосновеніе съ горячимъ, то мы замѣчамъ, что первое нагрѣвается, а послѣднее охлаждается. Можно сказать, что *одно* тѣло нагрѣвается *за счетъ другого*. Это уже приближается къ представленію о какомъ-то веществѣ, о *теплородѣ*, которое переходитъ изъ одного тѣла въ другое. Если двѣ массы воды m и m' не одинаковой температуры приходятъ во взаимное соприкосновеніе, то оказывается, что при быстромъ уравненіи темпера-

---

[1]) Подъ абсолютной температурой разумѣется температура въ 273°C. ниже точки замерзанія.

туръ ихъ обоюдныя измѣненія температуръ u и u' обратно пропорціональны массамъ и имѣютъ противоположные знаки, такъ что алгебраическая сумма произведеній есть.

$$m u + m' u' = 0.$$

Блэкъ назвалъ эти оба произведенія mu и $m'u'$, служащія основаніями для опредѣленія всего процесса, *количествами теплоты*, Послѣднія можно вмѣстѣ съ Блэкомъ *очень наглядно* представить, какъ мѣры количества вещества. *Существенное значеніе* имѣетъ однако не этотъ *образъ*, а неизмѣняемость вышеприведенной *суммы произведеній* при обыкновенныхъ явленіяхъ теплопроводности. Если гдѣ либо исчезаетъ какое нибудь количество теплоты, то вмѣсто него въ какомъ либо другомъ мѣстѣ возникаетъ ему равное. Это представленіе привело къ открытію удѣльной теплоты. Подъ конецъ признаетъ Блэкъ, что вмѣсто исчезнувшаго количества теплоты можетъ появиться и нѣчто другое, т. е. *растопленіе* или *испареніе* извѣстнаго количества вещества. Разрѣшая себѣ нѣкоторую вольность въ разсужденіяхъ, онъ еще сохраняетъ здѣсь излюбленное представленіе и разсматриваетъ исчезающее количество теплоты какъ еще существующее, но *скрытое*.

Весьма доступное для всѣхъ представленіе о *теплородѣ* было сильно поколеблено работами Майера и Джоула. Если количество теплоты можетъ быть *увиличиваемое* и *уменьшаемое*, то, по воззрѣніямъ того времени, теплота не можетъ быть *веществомъ*, а должна быть *движеніемъ*. Это побочное положеніе сдѣлалось много популярнѣе, чѣмъ все остальное ученіе объ энергіи. Все же мы можемъ убѣдиться, что современное *представленіе* о теплотѣ какъ *о движеніи* столь же несущественно, какъ и прежнее *представленіе о веществѣ*.

Оба эти представленія развивались или задерживались въ своемъ развитіи исключительно благодаря случайнымъ историческимъ обстоятельствамъ. Изъ того, что количеству теплоты соотвѣтствуетъ *механической* эквивалентъ, не слѣдуетъ еще, что теплота не вещество.

Это мы пояснимъ себѣ слѣдующимъ вопросомъ, который мнѣ иногда предлагали начинающіе. Существуетъ ли механическій эквивалентъ электричества, подобно механическому *эквиваленту* теплоты? Да и нѣтъ! Не существуетъ механиче-

въ самомъ опредѣленіи утвержденіе, что работоспособность или потенціальная энергія какой-нибудь тяжести прапорціональна высотѣ уровня (въ геометрическомъ смыслѣ), и что она при паденіи, при превращеніи, *убываетъ пропорціонально высотѣ уровня*. Нулевой уровень выбранъ здѣсь совершенно произвольно. Такимъ образомъ мы приходимъ къ равенству 2, изъ котораго, какъ слѣдствія, вытекаютъ всѣ остальныя выраженія.

Если мы примемъ во вниманіе, какой громадный скачокъ впередъ на пути своего развитія сдѣлала механика по сравненію съ другими отдѣлами физики, то не покажется удивительнымъ, что старались всюду, гдѣ это было удобно, примѣнить понятіи изъ области механики. Такъ, напримѣръ, понятіе *количества электричества* было образовано Кулономъ согласно понятію *массъ*. При дальнѣйшемъ развитіи ученія объ электричествѣ понятіе работы было тотчасъ же примѣнено и въ теоріи потенціала, и *высота уровня электричества* стала измѣряться работой, производимой единицей массы при движеніи ея до такого уровня. Этимъ самымъ также и для электрической энергіи вышеприведенное равенство со всѣми своими послѣдствіями пріобрѣтаетъ силу. Подобное же происходило и съ другими видами энергіи.

Особенный случай представляетъ однако *тепловая энергія*. Что теплота есть энергія, могло быть открыто лишь благодаря своеобразнымъ опытамъ, о которыхъ мы уже говорили. Измѣреніе же этой энергіи посредствомъ *блэковскаго количества теплоты* зависитъ отъ случайныхъ обстоятельствъ случайное незначительное измѣненіе въ теплоемкости c при измѣненіи температуры и случайное незначительное отклоненіе употребляемыхъ термометрическихъ скалъ отъ *скалы упругости газа* обусловливаетъ прежде всего то, что понятіе о количествѣ теплоты могло быть установлено, и что *количество теплоты* ct, соотвѣтствующее температурной разницѣ t, дѣйствительно почти пропорціонально *энергіи теплоты*. Совершенно случайнымъ обстоятельствомъ является то, что Амонтону вздумалось измѣрять температуру при помощиупругости газа. О работѣ

измѣренію Кулона, это количество теплоты не прапорціонально количеству электричества, содержащагося въ банкѣ, а прапорціонально $\frac{q^2}{s}$, гдѣ подъ q разумѣется это количество, а подъ s факторъ, находящійся въ зависимости отъ поверхности, формы и толщины стекла банки, или, короче говоря, прапорціонально энергіи заряженной банки. Если мы теперь съ помощью термометра совершенно разрядимъ банку, то мы получимъ извѣстное количество теплоты W. Если же мы посредствомъ термометра разрядимъ ее въ другую банку, то получимъ меньше, чѣмъ W. Остатокъ же мы можемъ еще получить, если мы теперь обѣ банки совершенно разрядимъ при помощми воздушнаго термометра, и этотъ остатокъ будетъ опять пропорціоналенъ энергіи обѣихъ этихъ банокъ. Итакъ, при первомъ неполномъ разряженіи часть дѣятельнаго электричества пропала.

Если разряженіе банки производитъ теплоту, то ея энергія измѣняется и величина послѣдней падаетъ по термометру Рисса. Количество же, по измѣренію Кулона, остается неизмѣннымъ.

Представимъ себѣ теперь, будто термометръ Рисса изобрѣтенъ раньше крутильныхъ вѣсовъ Кулона, что нетрудно сдѣлать, такъ какъ оба изобрѣтенія независимы другъ отъ друга. Что было бы естественнѣе, какъ не измѣрять количество заключающейся въ банкѣ электричества теплотою, получаемаго въ термометрѣ? Но тогда это такъ называемое количество электричества уменьшалось бы при развитіи теплоты или работы, между тѣмъ какъ теперь оно остается неизмѣннымъ; тогда слѣдовательно электричество не было бы веществомъ, а движеніемъ, между тѣмъ какъ теперь оно все еще считается веществомъ. Такимъ образомъ, если мы объ электричествѣ думаемъ иначе, чѣмъ о теплотѣ, то причина этого коренится въ историческомъ и совершенно случайномъ обстоятельствѣ.

Такъ же обстоитъ и съ другими физическими явленіями. Вода не исчезаетъ послѣ того, какъ произвела нѣкоторую *работу. Почему*? Потому что количество воды измѣряется при *помощи вѣсовъ*, подобно электричеству. Но представимъ себѣ,

что рабочая цѣнность воды называется количествомъ, и поэтому должна измѣряться не вѣсами, а, напримѣръ, мельницей, тогда это количество исчезало бы по мѣрѣ того, какъ совершалась работа. Нетрудно представить себѣ какое нибудь вещество, которое не такъ легко осязаемо, какъ вода. Мы не могли бы тогда совсѣмъ воспользоваться измѣреніемъ при помощи вѣсовъ, между тѣмъ какъ другіе способы измѣренія остались бы безъ примѣненія. Для теплоты исторически установленной мѣрой „количества“ является случайно рабочая цѣнность воды. Поэтому она и исчезаетъ, когда совершается работа. Отсюда не слѣдуетъ какъ то, что вода не вещество, какъ и обратное.

Если у кого-нибудь еще и теперь явилась бы охота представить себѣ воду въ видѣ вещества, то это удовольствіе можно было бы ему пожалуй разрѣшить. Для этого ему нужно было бы только вообразить, что то, что мы называемъ количествомъ теплоты, есть энергія вещества, количество котораго остается неизмѣннымъ, между тѣмъ какъ энергія измѣняется. И дѣйствительно, по аналогіи съ другими физическими наименованіями было бы гораздо лучше говорить — энергія теплоты, вмѣсто количество теплоты.

Итакъ, если мы удивляемся тому открытію, что теплота есть движеніе, то мы удивляемся тому, что никогда не было открыто. Совершенно безразлично и не имѣетъ ни малѣйшаго научнаго значенія, представляемъ ли мы теплоту въ видѣ вещества или нѣтъ.

Теплота въ однихъ отношеніяхъ представляется въ видѣ, вещества, въ другихъ—нѣтъ. Теплота такъ же *скрыта* въ парѣ какъ кислородъ въ водѣ.

5. Однообразіе въ формахъ проявленій различныхъ видовъ энергіи.

Разсужденія, на которыя я уже давно обращалъ вниманіе, выиграютъ много въ отношеніи ясности, если мы сосредоточимъ наше наблюденіе на однообразіе въ формахъ проявленій различныхъ видовъ энергіи [1]).

[1]) Впервые я указалъ на это въ моемъ сочиненіи: „Ueber die Erhaltung der Arbeit“ Prag 1872. — На аналогію же между механической и термической энергіями еще раньше обратилъ вниманіе Цейнеръ. Дальнѣйшіе выводы я далъ въ исторіи и *критикѣ* закона теплоты Карно. Отчеты засѣданій. Вѣнской *Академіи. Декабрь* 1892. Сравн. также выводы современныхъ „энергетиковъ“

Тяжесть P на высотѣ H_1 представляетъ энергію $W_1 = PH_1$. Пусть она опустится до меньшей высоты H_2, при чемъ пусть производится работа, которая пойдетъ на производство живой силы, теплоты, электрическаго заряда и т. д., короче говоря, преобразится, тогда въ *остаткѣ* получится еще энергія $W_2 = PH_2$. Мы имѣемъ равенство.

$$\frac{W_1}{H_1} = \frac{W_2}{H_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2.$$

Или же, если *преобразованую* энергію обозначимъ посредствомъ $W^1 = W_1 - W_2$, а *приведенную* до болѣе низкаго уровня черезъ $W = W_2$, то получимъ равенство

$$\frac{W^1}{W^1 + W} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3$$

вполнѣ аналогичное 1 равенству (стр. 23).

Указанное свойство является такимъ образомъ вовсе не своеобразнымъ для теплоты. Равенство 2 опредѣляетъ отношеніе энергіи, *отнимаемой* на высшемъ уровнѣ, къ *передаваемой* (остающейся) болѣе низкому; оно свидѣтельствуетъ о томъ, что эти *энергіи пропорціональный высотѣ уровней*. Равенство, аналогичное 2, возможно установить для *каждаго* вида энергіи, а потому и равенства, соотвѣтствующія 3 или 1, можно разсматривать, какъ относящіяся ко всякому виду энергіи. Для электричества, напримѣръ, H_1, H_2 означаютъ потенціалы.

Когда мы впервые замѣчаемъ описанную здѣсь аналогію въ законѣ превращенія энергіи, то она кажется намъ *поразительной и неожиданной*, такъ какъ мы не видимъ тотъ часъ ея причины. Но для того, кто пользуется сравнительно-историческомъ методомъ, эта причина не можетъ долго оставаться неизвѣстной.

Механическая работа, хотя и не носила принятаго теперь наименованія, является со временъ Галилея *основнымъ понятіемъ* механики и важнымъ принципомъ техники. Превращеніе работы въ силу, и наоборотъ, недалеко отъ того пониманія энергіи, которое впервые было использовано Гейгенсомъ, хотя Т. Юнгъ былъ первымъ, который употребилъ *слово* энергія. Если мы кромѣ того, обратимъ вниманіе на законъ сохраненія вѣса, (собственно говоря массы), то мы *найдемъ, поскольку* дѣло касается механической энергіи, уже

въ самомъ опредѣленіи утвержденіе, что работоспособность или потенціальная энергія какой-нибудь тяжести прапорціональна высотѣ уровня (въ геометрическомъ смыслѣ), и что она при паденіи, при превращеніи, *убываетъ пропорціонально высотѣ уровня*. Нулевой уровень выбранъ здѣсь совершенно произвольно. Такимъ образомъ мы приходимъ къ равенству 2, изъ котораго, какъ слѣдствія, вытекаютъ всѣ остальныя выраженія.

Если мы примемъ во вниманіе, какой громадный скачокъ впередъ на пути своего развитія сдѣлала механика по сравненію съ другими отдѣлами физики, то не покажется удивительнымъ, что старались всюду, гдѣ это было удобно, примѣнить понятіи изъ области механики. Такъ, напримѣръ, понятіе *количества электричества* было образовано Кулономъ согласно понятію *массъ*. При дальнѣйшемъ развитіи ученія объ электричествѣ понятіе работы было тотчасъ же примѣнено и въ теоріи потенціала, и *высота уровня электричества* стала измѣряться работой, производимой единицей массы при движеніи ея до такого уровня. Этимъ самымъ также и для электрической энергіи вышеприведенное равенство со всѣми своими послѣдствіями пріобрѣтаетъ силу. Подобное же происходило и съ другими видами энергіи.

Особенный случай представляетъ однако *тепловая энергія*. Что теплота есть энергія, могло быть открыто лишь благодаря своеобразнымъ опытамъ, о которыхъ мы уже говорили. Измѣреніе же этой энергіи посредствомъ *блэковскаго количества теплоты* зависитъ отъ случайныхъ обстоятельствъ случайное незначительное измѣненіе въ теплоемкости *с* при измѣненіи температуры и случайное незначительное отклоненіе употребляемыхъ термометрическихъ скалъ отъ *скалы упругости газа* обусловливаетъ прежде всего то, что понятіе о количествѣ теплоты могло быть установлено, и что *количество теплоты* ct, соотвѣтствующее температурной разницѣ t, дѣйствительно почти пропорціонально *энергіи теплоты*. Совершенно случайнымъ обстоятельствомъ является то, что Амонтону вздумалось измѣрять температуру при помощиупругости газа. О работѣ

теплоты отъ при этомъ, конечно, не думали.[1] Благодаря этому одинаково температурныя шкалы, при равныхъ измѣненіяхъ въ объемахъ, становятся пропорціональны уровню газа, слѣдовательно и работѣ, производимой газомъ. Такимъ образомъ получается, что высота температуры и высота уровня работы опять пропорціональны между собой.

Если бы мы выбрали признаки теплового состоянія, сильно уклоняющіеся отъ упругости газа, то это отношеніе могло бы оказаться весьма сложнымъ, и разсмотрѣнное вначалѣ сходство между теплотой и другими видами энергіи *не* существовало бы.

Такимъ образомъ однообразіе формъ проявленій различныхъ видовъ энергіи *не есть законъ природы*, а обусловливается скорѣе однообразіемъ нашего воззрѣнія, отчасти и случаемъ.

6. Различія энергій и границы принципа сохраненія энергіи.

Изъ любого количества теплоты Q, производящаго въ обратимомъ (безъ потерь) процессѣ въ предѣлахъ абсолютныхъ температуръ T_1 и T_2 опредѣленную работу, лишь дробная часть $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$ превращается въ работу, между тѣмъ какъ остатокъ переводится на болѣе низкій уровень температуры T_2. Эта переведенная часть при затратѣ произведенной работы и при обращеніи процесса можетъ быть опять поднята до уровня T_1. Если же процессъ *не* обратимъ, то на низшій уровень падаетъ *больше* теплоты, чѣмъ въ предыдущемъ случаѣ, и этотъ излишекъ не можетъ быть поднятъ до T_1 безъ *особой* затраты. Поэтому В. Томсонъ и обратилъ вниманіе на то обстоятельство, что при всѣхъ необратимыхъ процессахъ, слѣдовательно при всѣхъ *дѣйствительныхъ* процессахъ количества теплоты пропадаютъ для *механической* работы, что въ этихъ случаяхъ происходитъ *разсѣяніе* или *истребленіе механической* энергіи. Теплота всегда лишь *отчасти* переходитъ въ работу, работа же *часто цѣликомъ* переходитъ въ теплоту. Такимъ образомъ существуетъ *тенденція* къ уменьшенію механической энергіи и къ увеличенію тепловой энергіи въ мірѣ.

[1]) *Согласованіе* температуры съ уровнемъ работы было впервые сознательно установлено лишь В. Томсономъ (1848, 1851 гг.).

Для простого, свободнаго отъ потерь, замкнутаго кру-
юго процесса, при которомъ количество теплоты Q_1 отни-
этся отъ уровня T_1 и уровню T_2 передается количество
существуетъ соотвѣтствующее уравненію 2 отношеніе

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0.$$

$Q_1 = MT_1;\ Q_2 = MT_2;\ \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2};\ -\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$

Для любого сложнаго обратимаго кругового процесса
аузіусъ находитъ соотвѣтственную алгебраическую сумму

$$\sum \frac{Q}{T} = 0$$

если температура безпрерывно измѣняется, то

$$S\frac{dQ}{T} = 0 \ . \ . \ . \ . \ . \ 4.$$

При этомъ отнятые отъ уровня элементы количества
плоты считаются отрицательными, а сообщенные положи-
льными. Если же процессъ не обратимъ, то въ немъ фор-
ла 4 *увеличивается* послѣднюю Клаузіусъ называетъ *энтро-
й*. Въ дѣйствительности такъ всегда и случается, и Клау-
съ принужденъ прійти къ слѣдующимъ заключеніямъ:

1. Энергія міра остается постоянной.
2. Энергія міра стремится къ maximum'у.

Если мы признали однообразіе формъ проявленій раз-
ныхъ видовъ энергій, то насъ должна поразить здѣсь упо-
нутая своеобразность тепловой энергіи.

Откуда происходитъ эта своеобразность, если *всякая*
ргія вообще лишь отчасти переходитъ въ другую форму,
но также какъ тепловая энергія? Объясненіе мы найдемъ
слѣдующемъ:

Всякое превращеніе какого-нибудь вида энергіи А свя-
о съ паденіемъ потенціала *этого* вида энергіи; теплота не
ставляетъ исключенія. Но между тѣмъ какъ для другихъ
довъ энергіи съ паденіемъ потенціала связано также об-
тно и превращеніе, а поэтому и потеря энергіи, именно
го вида энергіи, который падаетъ въ потенціалѣ, — совер-
нно иначе обстоитъ дѣло съ теплотой. Теплота можетъ
етерпѣть паденіе потенціала безъ того, чтобы, по крайней
рѣ согласно обычному измѣренію, нести потерю энергіи.

Если падаетъ какая нибудь тяжесть, то неизбѣжно должна произойти кинетическая энерція, или теплота, или какая-нибудь другая энергія. Также и электрическій зарядъ не можетъ претерпѣть паденіе потенціала безъ потери энергіи, т.-е. безъ превращенія. Теплота же, напротивъ, можетъ съ паденіемъ температуры перейти на тѣло съ большей теплоемкостью и *та же самая* тепловая энергія можетъ удерживаться до тѣхъ поръ, пока всякое количество теплоты мы будемъ разсматривать какъ энергію. Въ этомъ обстоятельствѣ и заключается то, что во многихъ случаяхъ и придаетъ теплотѣ, наряду съ особенностью ея энергіи, характеръ какого-то (матеріальнаго) *вещества, количества*.

Если мы взглянемъ на дѣло безпристрастно, то мы должны спросить себя, *имѣемъ ли вообще какой-нибудь научный смыслъ и цѣль* разсматривать какъ энергію количество теплоты, которую уже нельзя болѣе превратить въ механическую работу (напримѣръ, теплоту замкнутой системы тѣлъ съ совершенно равномѣрной температурой). Несомнѣнно, что въ данномъ случаѣ принципъ сохраненія энергіи играетъ совершенно праздную роль, которая удѣляется ему лишь по привычкѣ. Если несмотря на признаніе разсѣянія или истребленія механической энергіи, несмотря на увеличеніе энтропіи, мы будемъ придерживаться принципа сохраненія энергіи, то это значитъ позволить себѣ ту же вольность, которую разрѣшилъ себѣ Блэкъ, разсматривая теплоту плавленія какъ еще существующую, но находящуюся въ *скрытомъ* состояніи.

Позволимъ себѣ еще замѣтить, что выраженія „энергія міра" и „энтропія міра" носясъ на себѣ отпечатокъ схоластики. Энергія и энтропія суть понятія *мѣры*. Какой смыслъ можетъ имѣть примѣненіе этихъ понятій къ случаю, къ которому они именно не примѣнимы, въ которомъ ихъ значеніе неопредѣлимо?

Если бы дѣйствительно возможно было опредѣлить энтропію *міра*, то она именно представляла бы собой абсолютную мѣру времени. Отсюда несомнѣнно, что слѣдующее выраженіе есть лишь тавтологія: энтропія *міра* увеличивается вмѣстѣ съ временемъ. То, что извѣстныя измѣненія совершаются лишь въ *опредѣленномъ* смыслѣ, и фактъ времени — совпадаютъ воедино.

7. Источники принципа сохраненія энергіи.

Мы теперь подготовлены къ тому, чтобы отвѣтить на вопросъ объ источникахъ принципа сохраненія энергіи. Въ конечномъ счетѣ всякое познаніе природы покоится на *опытѣ*. Въ этомъ смыслѣ правы слѣдовательно тѣ, которые смотрятъ и на принципъ сохраненія энергіи, какъ на результатъ опыта.

Опытъ учитъ, что чувственные элементы a, b, c, d, на которые можетъ быть разложенъ міръ, подвержены *измѣненію*; далѣе, что одни изъ этихъ элементовъ соединены съ другими такъ, что они вмѣстѣ появляются и исчезаютъ, или что появленіе элементовъ одного рода соединено съ исчезновеніемъ элементовъ другого рода. Понятій причины и слѣдствія мы будемъ избѣгать изъ-за ихъ расплывчатости и многозначительности. Результатъ опыта можетъ быть выраженъ въ слѣдующихъ словахъ: *Чувственные элементы міра* (a, b, c, d.) *находятся въ зависимости другъ отъ друга*. Эту взаимную зависимость лучше всего представить себѣ такъ, какъ представляютъ себѣ въ геометріи взаимную зависимость между сторонами и углами въ треугольникѣ, лишь значительно разнообразнѣе и сложнѣе.

Примѣромъ можетъ служить масса газа, занимающая въ какомъ-нибудь цилиндрѣ опредѣленный объемъ (a), который мы измѣняемъ посредствомъ давленія (b) на поршень; ощупывая тогда рукой цилиндръ, мы получимъ ощущеніе теплоты. Увеличеніе давленія уменьшаетъ объемъ и повышаетъ ощущеніе теплоты.

Различные факты, предоставляемые опытомъ, не вполнѣ сходны между собой. Но ихъ общіе чувственные элементы выдѣляются, благодаря процессу абстракціи, и внѣдряются въ память. Такимъ образомъ, мы приходимъ къ выраженію того, что обще для цѣлыхъ группъ фактовъ.

Даже самое простое положеніе, которое мы можемъ выразить, представляетъ по природѣ языка такую абстракцію. Но необходимо принять въ разсчетъ и *различія* между родственными фактами. Факты могутъ настолько приближаться другъ къ другу, что элементы a, b, c, въ одномъ изъ нихъ вполнѣ

однородны съ элементами другого и отличаются лишь числомъ одинаковыхъ частей, на которые эти факты могутъ быть разложены. Если удается вывести правила для *численнаго измѣренія* a, b, c, то имѣемъ *самое общее* выраженіе и вмѣстѣ съ тѣмъ соотвѣтствующее всѣмъ *различіямъ* группы фактовъ. Это есть цѣль количественнаго изслѣдованія.

Допустивъ, что эта цѣль достигнута, мы найдемъ, что между a, b, c, какой-нибудь группы фактовъ, или между ихъ численными измѣреніями, существуетъ извѣстное число равенствъ. Фактъ *измѣненія* сопровождается тѣмъ, что число этихъ равенствъ должно быть *меньше*, числа a, b, c. Если первое меньше второго на *одну единицу*, то часть a, b, c. опредѣляется другой, при чемъ имѣетъ одно значеніе.

Отысканіе соотношеній послѣдняго рода является важнѣйшимъ выводомъ спеціальнаго экспериментальнаго изслѣдованія, такъ какъ благодаря этому мы получаемъ возможность *мысленно* пополнить факты, которые намъ даны *отчасти*. Само собой понятно, что лишь *опытъ* можетъ показать, что между a, b, c, *вообще* существуетъ связь и *какого рода* эта связь.

Далѣе, лишь *опытъ можетъ научить* насъ тому, что существуетъ между a, b, c, такія отношенія, что наступившія въ нихъ измѣненія могутъ быть *возстановлены*. Если бы не существовало этого обстоятельства, то, весьма понятно, не существовало бы и никакого повода къ установленію принципа сохраненія энергіи. *Слѣдовательно въ опытѣ находится послѣдній источникъ всякаго познанія природы; въ этомъ смыслѣ тамъ же находится источникъ принципа сохраненія энергіи.*

Это не исключаетъ однако того, что принципъ сохраненія энергіи имѣетъ также *логическій корень*; послѣднее будетъ ясно изъ послѣдующаго. Допустимъ на основаніи *опыта*, что одна группа чувственныхъ элементовъ a, b, c. опредѣляетъ лишь въ одномъ смыслѣ другую группу l, m, n. Далѣе опытъ учитъ, что измѣненіе a, b, c. можетъ быть *обратимо*. Отсюда вытекаетъ тогда *логическое* слѣдствіе, что каждый разъ, *какъ a, b,* c. пріобрѣтаютъ одно и то же значеніе, то же *происходитъ* и съ l, m, n. или, что одни періодическія измѣ-

ченія a, b, c. не могутъ имѣть своимъ слѣдствіемъ *постоянное* измѣненіе. Если группа l, m, n. *механическая*, то этимъ самымъ *исключается perpetuum mobile*.

Могутъ замѣтить, что это только *заколдованный кругъ* и что его признаютъ и безъ дальнѣйшихъ доказательствъ. Но *психологически* ситуація наша все же существенно различна, думаемъ ли мы только объ *однозначащей* опредѣленности и обратимости явленій, или исключаемъ perpetuum mobile. Въ обоихъ случаяхъ вниманіе наше направлено въ *различныя* стороны и освѣщаетъ *различныя* стороны дѣла, которыя логически, конечно, неизбѣжно находятся во взаимной связи.

Строгій логическій порядокъ мыслей великихъ изслѣдователей (Стевинъ, Галилей), котораго они придерживаются сознательно или инстинктивно благодаря тонкому чутью по отношенію къ малѣйшимъ противорѣчіямъ, не имѣетъ, несомнѣнно, никакой другой цѣли, какъ ограничить, такъ сказать, до *извѣстной степени* свободу мысли и тѣмъ самымъ устранить возможность заблужденія. Такимъ образомъ устанавливается *логическое основаніе* принципа исключеннаго perpetuum mobile, т.-е. то общее убѣжденіе, которое уже существовало до развитія механики и которое сыграло роль въ этомъ ея развитіи.

Вполнѣ естественно, что принципъ исключеннаго perpetuum mobile прежде всего развился въ болѣе простой области чистой механики. Перенесенію этого принципа въ область всей физики способствовало несомнѣнно то представленіе, что всѣ физическія явленія представляютъ собою собственно механическіе процессы. Предыдущее разсужденіе показываетъ, однако, какъ не существенно это представленіе. Здѣсь дѣло касается скорѣе познаніе *всеобщей связи явленій природы*. Если эта связь устанавливается, то становится очевиднымъ (какъ и изслѣдователю Карно), что не имѣетъ значенія, проявляются ли механическіе законы непосредственно или косвеннымъ путемъ.

Принципъ исключеннаго perpetuum mobile, правда, очень близко соприкосается съ современнымъ принципомъ сохраненія энергіи, но *не идентиченъ* ему, такъ какъ послѣдній вытекаетъ изъ перваго лишь при особомъ формальномъ воз-

зрѣніи. Согласно предыдущему изложенію, perpetuum mobile можно исключить, не пользуясь понятіемъ *работы* или даже не зная о немъ. *Современный принципъ сохраненія энергіи* выводится изъ *субстанціональнаго* пониманія работы и всякаго вообще измѣненія физическаго состоянія, которое, въ случаѣ обратимости процесса, производитъ работу. Особенно ясно проявилась потребность въ такого рода воззрѣніи у I. Р. Майера и Джоула; воззрѣніе это *не необходимо*, но *очень удобно* и *наглядно съ формальной стороны*. Уже было замѣчено, что оба эти изслѣдователя прониклись этимъ воззрѣніемъ благодаря тому наблюденію, что какъ полученіе теплоты, такъ и механической работы связано съ *затратой вещества*. Майеръ говоритъ: „Ex nihilo nil fit“, [1]) а въ другомъ мѣстѣ: *созданіе* или *уничтоженіе* какой либо силы (работы) находится внѣ области человѣческаго дѣйствія. У Джоула же мы находимъ слѣдующее мѣсто: „It is manifestly absurd to suppose that the powers with vhich sod has endowed matter can be destroyed“ [2]). Въ этихъ положеніяхъ хотѣли видѣть попытку *метафизическаго* обоснованія ученія объ энергіи. Въ этихъ положеніяхъ я усматриваю исключительно формальную потребность въ *наглядномъ*, *краткомъ*, *простомъ вычисленіи*, развившееся благодаря потребностямъ практической жизни и перенесенное затѣмъ, насколько это было возможно, въ область науки. Дѣйствительно, въ письмѣ Майера къ Гризингеру читаемъ мы: .....Если ты спросишь, какъ я пришелъ къ этому выводу, то мой отвѣтъ будетъ простъ: во время моего морского путешествія я, занимаясь почти исключительно изученіемъ физіологіи, открылъ новое ученіе. Достаточнымъ основаніемъ для этого открытія послужило *ясно сознаваемая мною потребность въ немъ*.

Субстанціональное пониманіе работы (энергіи) совсѣмъ *на необходимо*, и еще очень далеко до того, чтобы съ потребностью въ такого рода пониманіи разрѣшалась и задача. Напротивъ, мы увидимъ, какъ Майеръ старается постепенно удовлетворить своей потребности. Онъ считалъ первоначально *количество движеній* (mv) эквивалентнымъ работѣ и только позднѣе напалъ на мысль о *живой силѣ*. Въ области электричества онъ не могъ подыскать выраженія эквивалентнаго ра-

---

[1]) *Изъ* ничего ничего не происходитъ.

боть; это сдѣлалъ позднѣе Гельмгольцъ. Итакъ *формальная потребность* существовала раньше и лишь затѣмъ постепенно міровоззрѣніе приспособлялось къ ней.

Уясненіе *экспериментальнаго*, *логическаго* и *формальнаго* корня современнаго принципа сохраненія энергіи можетъ существенно способствовать устраненію мистики, которая еще соединена съ этимъ принципомъ. По отношенію же нашей формальной потребности въ простѣйшемъ, нагляднѣйшемъ, субстанціональномъ пониманіи происходящихъ вокругъ насъ процессовъ остается вопросъ открытымъ, насколько можетъ соотвѣтствовать этой потребности природы или *мы*. Если принять во вниманіе одинъ изъ вышеприведенныхъ выводовъ то думается, что субстанціональное пониманіе принципа сохраненія энергія равно какъ и субстанціональное пониманіе теплоты Блэка, имѣетъ свои естественныя границы въ тѣхъ фактахъ, за предѣлами котораго оно можетъ быть закрѣплено только искусственно.

И. И. Кальнинга съ предисловіемъ проф. Имп. Моск. Универс. Н. Ѳ. Голубева. Изданіе бр. Столляръ. Цѣна 1 р. 25 коп.

II. ОТДѢЛЪ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ КРИТИКИ.

М. Фриче. Торжество пола и гибель цивилизаціи. (По поводу книги Вейнингера „Полъ и характеръ"). Цѣна 55 коп.

двигъ Зерингъ. Метерлинкъ, какъ философъ и поэтъ. Цѣна 60 к.

ьфданъ Лангаардъ Оскаръ Уайльдъ. Его жизнь и литературная дѣятельность. 2-е изданіе. Цѣна 40 коп

каилъ Тригоринъ. Проблема пола и «Санинъ» Арцыбашева 2-ое изданіе. Цѣна 35 коп.

III. ОТДѢЛЪ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

ядные сборники. Книга первая. Цѣна 1 рубль.

ядные сборники. Книга вторая. Цѣна 1 руб.

манъ Зудерманъ Розы. Тетралогія. Цѣна 1 р.

Содержаніе: Лучи солнца. Марго. Прощальный визитъ. Принцесса

тавъ афъ Гейерстамъ. Полное собраніе сочинен.

Томъ первый. (Съ портретомъ автора). Комедія брака. Романъ. Съ вступительной статьей Ю. А. Веселовскаго. Цѣна 1 руб.

тавъ афъ Гейерстамъ. Полное собраніе соч. **Томъ второй.** Роковыя силы. Цѣна 1 руб. Романъ (Печатается).

густъ Стриндбергъ. Полное собраніе сочиненій. **Томъ первый.** (Съ портретомъ автора). Исповѣдь глупца. Романъ. 2-е изд. Цѣна 1 руб.

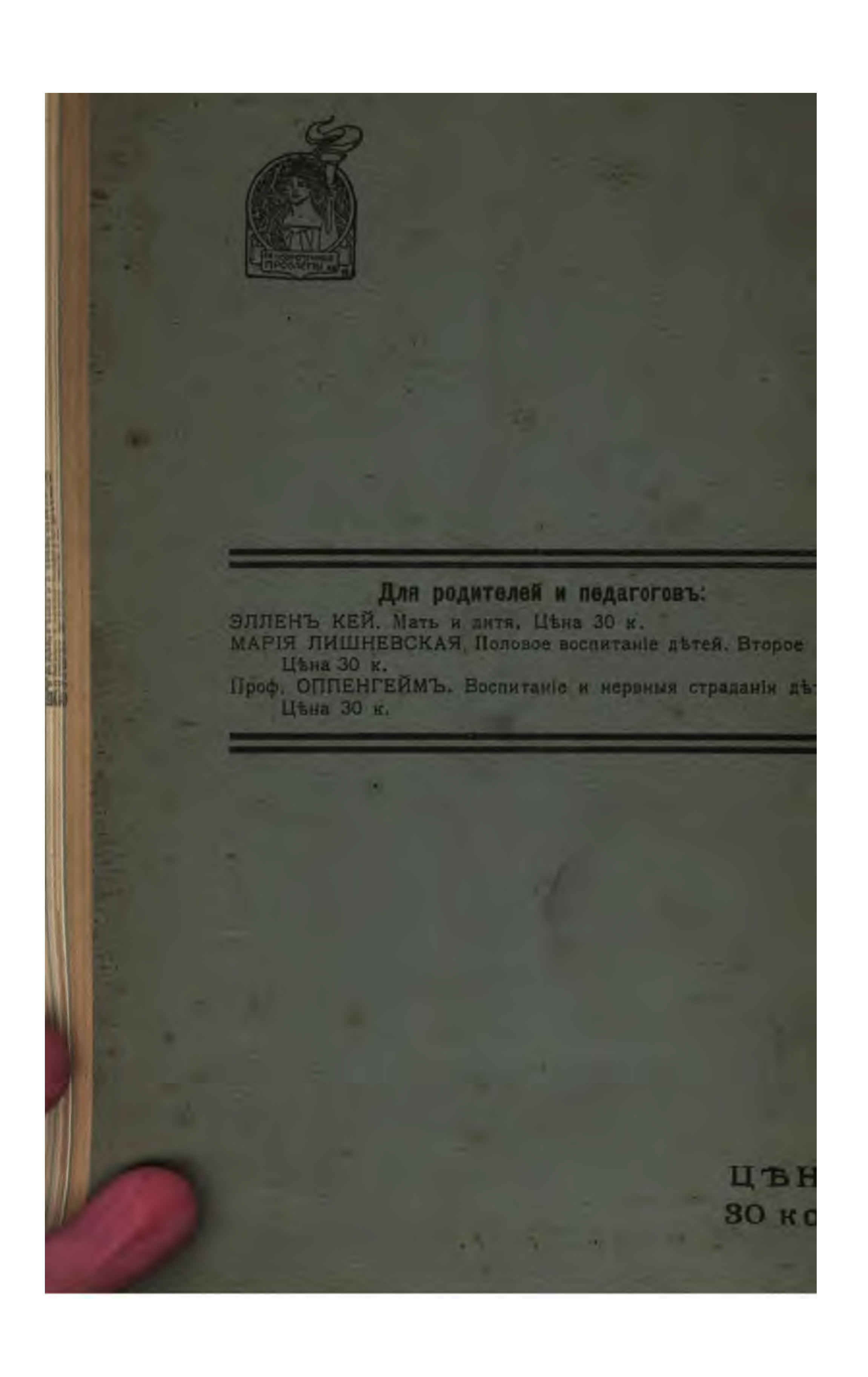
густъ Стриндбергъ. Полное собраніе сочиненій. **Томъ второй.** Адъ. Романъ. Съ предисловіемъ прив.-доц. В. М. Фриче Цѣна 1 руб.

[illegible]
[illegible]

[illegible]
[illegible]

[illegible]
[illegible]

[illegible]
[illegible]



ЦѢН
30 ко

Sonderabdruck

aus

Jahrbuch

der

Radioaktivität und Elektronik

Herausgegeben von Prof. Dr. **J. Stark** in Hannover.

Preis für den Jahresband in 4 Heften 15 M.

Verlag von S. HIRZEL in Leipzig.

Aus: Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik. V. Band. Heft 1.

Aus: Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik. V. Band. Heft 1.

Über die magnetischen Wirkungen elektrischer Konvektion.

(Bericht.)

Von **A. Eichenwald.**

Literatur.

1. M. Faraday, Exp. res. XIII. ser. art. 1654—1657, 1838; Ostwalds Klassiker Nr. 128.
2. J. C. Maxwell, Electricity and Magnetism. II. art. 769, 770, 1873.
3. H. v. Helmholtz, Abhandlungen I, S. 791. Poggend. Ann. **158**, 487, 1876; Berichte d. Berlin. Akad. S. 211, 1876.
4. H. A. Rowland, Americ. J of Science, p. 30, 1878.
5. W. C. Röntgen, Berichte d. Berlin. Akad., S. 198, 1885; Wied. Ann. **35**, 264, 1888; **40**, 93, 1890.
6. E. Lecher, Repert. d. Phys., S. 151, 1889.
7. F. Himstedt, Wied. Ann. **38**, 560, 1889; **40**, 720, 1890.
8. H. Rowland u. C. Hutchinson, Phil. Mag. (5) **27**, 445, 1889.
9. V. Crémieu, C. R. **130**, 1544; **131**, 578, 797, 1900; **132**, 327, 1108, 1901; **135**, 27, 154, 1902; Ann. d. chim. phys. (7) **24**, 85, 145, 299, 1901. Thèse. Paris, Gauthier-Villars S. 117, 1901.
10. H. Pender, Phil. Mag. (6) **2**, 179, 1901; (6) **5**, 34, 1903.
11. E. Adams, Phil. Mag. (6) **2**, 285, 1901.
12. H. Pender u. V. Crémieu, C. R. **136**, 548, 607, 955, 1903; J. d. Phys. (4) **2**, 641, 1903; Phil. Mag. (6) **6**, 442, 1903.
13. N. V. Karpen, J. d. Phys. (4) **2**, 667, 1903; Ann. chim. phys. (8) **2**, 465, 1904.
14. F. Himstedt, Ann. d. Phys. **13**, 100, 1904.
15. A. Eichenwald, Phys. Ztschr. **2**, 703, 1901; **4**, 308, 1903; Ann. d. Phys. **11**, 1, 421, 1903; **13**, 919, 1904. Ausführlich: Über die magnetischen Wirkungen bewegter Körper im elektrostatischen Felde (russisch). Moskau, 143 S., 1904. Vgl. auch: H. A. Lorentz, Enzykl. d. math. Wiss. V. 2, S. 97, 210, 1904; M. Abraham, Theorie d. Elektr. I., S. 425, II., S. 314, 1905; Winkelmanns Handbuch d. Physik, II. Aufl. V. 1., S. 426, V 2, S. 528, 1908.

1. Einleitung.

Man unterscheidet bekanntlich drei verschiedene Gattungen von elektrischen Strömen:

1. Die Leitungsströme in Leitern.
2. Die Verschiebungsströme in Isolatoren.
3. Die Konvektionsströme oder die Bewegung der Elektrizität samt ihrem materiellen Träger, sei es ein Leiter oder ein Isolator.

Nach den großen Entdeckungen von Oerstedt, Ampère und Faraday sind die magnetischen Wirkungen der Leitungsströme auf

das gründlichste untersucht worden, und die von H. Hertz realisierten elektrischen Strahlen beweisen, daß die Verschiebungsströme, wie es C. Maxwell vorhergesagt hat, nach denselben Gesetzen magnetisch wirksam sind, wie die Leitungsströme. Nun sind aber nach der Vorstellung der Elektronentheorie alle Ströme — abgesehen von den Verschiebungen im Äther selbst — eigentlich Konvektionsströme, indem die Elektronen allein oder zusammen mit irgendwelchen materiellen Trägern (Ionen) sich bewegen. Der Nachweis, daß auch die Konvektionsströme ein magnetisches Feld erregen, ist also gerade für die Elektronentheorie von fundamentaler Bedeutung, und diesen Nachweis verdanken wir in erster Linie H. Rowland.

2. Historisches.

Die Frage, ob überhaupt die elektrische Konvektion von einem magnetischen Felde begleitet wird, finden wir schon bei M. Faraday[1]), welcher schreibt: „So stimmen denn die drei sehr verschiedenen Entladungsweisen: Leitung, Elektrolysierung und zerreißende Entladung. darin überein, daß sie das wichtige Transversalphänomen des Magnetismus hervorbringen. Ob auch die Fortführung oder fortführende Entladung dasselbe Phänomen erzeugt, ist noch nicht ermittelt, und die wenigen Versuche, die ich bis jetzt zu machen Zeit hatte, erlauben mir nicht, die Frage zu bejahen."

Auch C. Maxwell[2]) hat sich für diese Frage interessiert und gibt sogar eine Versuchsanordnung an, welche, nach seiner annähernden Rechnung, die magnetische Wirkung bewegter Ladung zu beobachten erlauben würde. Diese Anordnung besteht aus einer rotierenden geladenen Scheibe, in deren Nähe eine von elektrostatischen Einflüssen metallisch geschützte Magnetometernadel aufgehängt ist. Wir sehen also, daß die von C. Maxwell schon im Jahre 1873 vorgeschlagene Anordnung im Prinzip mit den später von verschiedenen Autoren benutzten Versuchsanordnungen identisch ist. C. Maxwell schließt seine Rechnungen mit den Worten: „Daher würde eine auf höchste geladene Ebene, wenn sie sich in sich selbst mit der nicht unbeträchtlichen Geschwindigkeit von 100 m in der Sekunde bewegt, magnetisch ein Viertausendstel von der Kraft, mit der die Erde in horizontaler Richtung in unseren Breiten wirkt, aufweisen. Das ist eine zwar geringe, aber doch meßbare Kraftgröße. Ich weiß nicht, ob man bisher einen solchen Versuch wirklich angestellt hat."

Ein solcher Versuch ist bekanntlich zum ersten Male im Jahre 1876

im Laboratorium von H. v. Helmholtz[3]) von H. A. Rowland[4]) angestellt und mit Erfolg durchgeführt worden.

Späterhin hat diese Frage ein sehr eigentümliches Schicksal erlitten. — So konnte W. C. Röntgen[5]) die Rowlandschen Versuche bestätigen, E. Lecher[6]) aber nicht; F. Himstedt[7]) und H. A. Rowland mit C. T. Hutchinson[8]) vervollkommneten die Versuchsanordnung und erzielten übereinstimmende positive Resultate; V. Crémieu[9]) dagegen bemühte sich vergeblich, die magnetischen Wirkungen der elektrischen Konvektion in verschiedenster, direkter wie auch indirekter Weise nachzuweisen. Endlich haben die Versuchsresultate einer ganzen Reihe von Beobachtern, wie H. Pender[10]), E. P. Adams[11]), H. Pender und V. Crémieu[12]), N. V. Karpen[13]), F. Himstedt[14]) und meine[15]) eigenen Untersuchungen den Rowland-Effekt über jeden Zweifel erhoben.

Dazu muß man aber bemerken, daß die ersten Untersuchungen auf diesem Gebiete, auch die mit positiven Ergebnissen, manche Fragen, die elektrische Konvektion betreffend, unerörtert ließen und außerdem einige begleitende Erscheinungen enthielten, welche von der Theorie nicht erklärt werden konnten.

So gelang es zum Beispiel F. Himstedt[7]), die magnetischen Wirkungen von zwei rotierenden geladenen Scheiben so zu steigern, daß er Ablenkungen der Magnetnadel (bei 3 m Skalenabstand) bis zu 100 mm beobachten konnte. Er machte damals nur relative Messungen und bestätigte die Proportionalität der magnetischen Feldstärke und des Konvektionsstromes. Aber diese Proportionalität reichte nur bis zu den Potentialen von etwa 4000 Volt, — bei höheren Potentialen waren die magnetischen Wirkungen kleiner, als es nach der Proportionalität zu erwarten war. F. Himstedt sah „keine andere Möglichkeit, diese Erscheinung zu erklären, als anzunehmen, daß die elektrische Ladung an dem ponderablen Träger derart haftet, daß sie mit ihm sich bewegt, daß aber bei höheren Spannungen ein Teil der Ladung gar nicht mehr mit dem Träger rotiert".

H. Rowland und C. T. Hutchinson[8]) erstrebten das Ziel, möglichst genaue absolute Messungen zu machen, und obgleich sie viel kleinere Ablenkungen der Magnetnadel erhielten als F. Himstedt, so konnten sie doch aus ihren Versuchen das Verhältnis der elektromagnetischen zu den elektrostatischen Einheiten berechnen und erhielten so eine Zahl zwischen $2{,}26 \cdot 10^{10}$ und $3{,}78 \cdot 10^{10}$; als Mittelwert aus 20 Versuchsreihen ergab sich $c = 3{,}19 \cdot 10^{10}$. Die von F. Himstedt beobachtete Erscheinung haben sie sogar bei noch höheren Potentialen bis 8000 Volts nicht beobachtet, dafür ergab sich aber eine andere Eigen-

tümlichkeit: es waren nämlich die Ausschläge der Magnetnadel beim Zeichenwechsel der Geschwindigkeit, bei sonst gleichen Versuchsbedingungen merkwürdigerweise nicht gleich; und diese Ungleichheit konnte den Beobachtungsfehlern nicht zugeschrieben werden.

Zur Aufklärung aller dieser Fragen unternahm ich, die Versuche über die magnetischen Wirkungen der elektrischen Konvektion von neuem zu untersuchen, und schon die ersten Versuche mit einer einfachen Zentrifugalmaschine zeigten mir, daß die Existenz dieser Wirkungen keinem Zweifel unterliegen kann und daß es sich lediglich um die Konstruktion eines solide gebauten und gut isolierenden Apparats handelte, damit die magnetische Wirkung bewegter Ladung mit voller Klarheit zutage trete und möglichst genaue absolute Messungen gestatte.

Inzwischen ist dieselbe Frage von mehreren Autoren in Angriff genommen worden. So publizierte V. Crémieu[9]) eine große Anzahl von Arbeiten, welche aber den Rowlandschen Versuchen völlig widersprachen. Um sich von den störenden Einflüssen der rotierenden geladenen Scheibe auf das Magnetometer zu befreien, schlug V. Crémieu einen neuen Weg ein: er beobachtete nicht direkt das magnetische Feld, sondern die Induktionsströme, welche bei der Veränderung des magnetischen Feldes einer mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegten, aber mit der Zeit veränderlichen Ladung erzeugt werden. Die Induktionsströme wurden durch einen Kommutator gleichgerichtet und mit einem empfindlichen Galvanometer gemessen. Diese Anordnung hatte den Vorteil, daß die Magnetnadel fern von der rotierenden Scheibe aufgestellt werden konnte und auf diese Weise von verschiedenen Störungen befreit wurde; dessenungeachtet blieb die erwartete magnetische Wirkung der Konvektionsströme völlig aus. Aus dieser Tatsache konnte sofort geschlossen werden, daß, wenn man einen Stromkreis aus zwei Teilen zusammenstellt und im ersten Teile die Elektrizität durch Leitung, im zweiten aber durch Konvektion fortführen läßt, daß dann nur der erste Teil ein magnetisches Feld erzeugen würde, der zweite dagegen nicht; es würden auf diese Weise sogenannte „offene Ströme“ realisiert werden. Das wurde von V. Crémieu*) tatsächlich in einem besonders angestellten Versuche beobachtet. V. Crémieu negierte daher jede magnetische Wirkung elektrischer Konvektion und alle darauf gegründeten theoretischen Folgerungen.

---

*) C. R. **132**, 1108, 1901.

H. Pender[10]) dagegen, welcher bei H. Rowland selbst arbeitete und dieselbe Methode wie V. Crémieu benutzte, erhielt positive und sogar sehr genaue Resultate.

Nach dem Vorschlag von H. Poincaré vereinigten sich diese beiden Autoren, H. Pender und V. Crémieu[12]), in Paris und unternahmen eine gemeinschaftliche Untersuchung. Nach einigen Versuchen gelang es ihnen zusammen den Rowland-Effekt zu erhalten, es trat aber wieder eine neue Erscheinung zutage. Wenn man nämlich den bewegten Leiter, um seine Isolation zu vergrößern, mit Glimmer bedeckte, so verminderten sich die beobachteten magnetischen Wirkungen der Konvektionsströme und bei zwei dünnen Glimmerschichten wurden die Wirkungen zehnmal kleiner als ohne Glimmer.

Bei meinen nach der direkten magnetometrischen Methode angestellten Versuchen trat diese Erscheinung nie ein, auch N. Karpen[13]), der ja nach einer Methode arbeitete, welche sehr ähnlich der Crémieuschen war (es wurden statt der intermittierenden sinusförmige Ströme von einem Transformator zur Ladung der rotierenden Scheiben benutzt), hat den Einfluß der Glimmerschichten auf die magnetischen Wirkungen der Konvektionsströme nicht konstatiert, und da endlich auch vom theoretischen Standpunkte aus, wie unten auseinandergesetzt, dieser Einfluß der Glimmerschichten unerklärlich bleibt, so bin ich der Meinung, daß er einem Versuchsfehler zuzuschreiben ist. Sehr wahrscheinlich ist es, daß alle die von F. Himstedt, H. Rowland und C. Hutchinson, sowie von H. Pender und V. Crémieu beobachteten störenden Erscheinungen in Isolationsfehlern, Spitzenentladungen und dergleichen ihren Grund haben.*)

Alle diese Beispiele zeigen, wie vorsichtig man bei diesen Versuchen vorgehen muß. Ich baute mir deshalb einen besonderen Apparat, der mir die magnetischen Wirkungen der elektrischen Konvektion und alle damit zusammenhängenden Fragen nach einem einheitlichen Plane und unter möglichst variierten Versuchsbedingungen experimentell zu studieren erlaubte.

3. Beobachtungsmethoden.

Bei der Untersuchung des Rowland-Effektes kann man zwei wesentlich verschiedene Methoden benutzen.

Bei der einen beobachtet man direkt das magnetische Feld, welches von einer gleichförmig bewegten Ladung erzeugt wird; diese Methode

*) Vergl. A. Eichenwald, Ann. d. Phys. 11, 11—14 (Versuchsfehler), 1903.

ist von H. Rowland selbst und fast von allen anderen Beobachtern benutzt worden. Bei der zweiten von H. Pender gewählten Methode werden die Induktionsströme beobachtet, welche bei der Veränderung des magnetischen Feldes einer mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegten, aber mit der Zeit veränderlichen Ladung erzeugt werden.

Die zweite Methode mag verschiedene Vorteile in bezug auf Bequemlichkeit der Beobachtung darbieten, ich habe dennoch der ersten den Vorzug gegeben, erstens weil das eine direkte Methode ist, und zweitens, weil wir dabei nur statische Felder benutzen, was für den Vergleich mit der Theorie von Wichtigkeit ist. In der Tat sind ja die Versuchsbedingungen bei der Induktionsmethode sehr kompliziert, denn neben den Konvektionsströmen treten hier noch Leitungsströme beim Laden und Entladen hinzu. Bei allen meinen Versuchen wurden stets statische elektrische Felder erzeugt und die durch die Bewegung der Ladung erregten statischen magnetischen Felder direkt mit einem Magnetometer gemessen. Die Messung selbst geschah in der Weise, daß man die Wirkungen des Konvektionsstromes mit denen eines gewöhnlichen konstanten Leitungsstromes verglich.

Was die Einzelheiten des Apparates und der Versuchsanordnung, sowie die nötigen Vorsichtsmaßregeln und die möglichen Versuchsfehler anbetrifft, so muß ich mich mit dem Hinweis auf die Originalarbeiten begnügen und will hier die Frage nur vom prinzipiellen Standpunkte aus behandeln.

Der Natur der Sache entsprechend, wollen wir im folgenden die bewegten Leiter und die bewegten Dielektrika gesondert behandeln.

4. Bewegte Leiter.

Bewegt sich ein Leiter in einem elektrischen Felde und zwar so, daß an jedem Teile seiner Oberfläche die elektrische Erregung εE sich mit der Zeit nicht ändert, so muß auch die elektrische Dichte ϱ im Leiter überall konstant bleiben, denn

$$4\pi\varrho = \varepsilon E_n .$$

Solche Fälle wollen wir „reine elektrische Konvektion" nennen. Wenn aber irgendwelche Teile des Leiters bei ihrer Bewegung in solche Stellen des Raumes kommen, wo εE verschieden ist, so entstehen infolge der Bewegung besondere Leitungsströme, — wir wollen sie Konduktionsströme nennen, — welche natürlich ihr eigenes Magnetfeld erzeugen und so die magnetischen Wirkungen des Konvektionsstromes entstellen.

Stehen zum Beispiel zwei vertikal geladene Scheiben einander

gegenüber, wie es bei den meisten Versuchen der Fall war, und rotiert die eine oder die andere, oder beide Scheiben rotieren gleichzeitig mit konstanter Geschwindigkeit um ihre horizontale Symmetrieachse, so haben wir den ersten Fall und besonders angestellte Versuche zeigen, daß in diesem Falle tatsächlich keine Leitungsströme entstehen; wir haben hier eine reine elektrische Konvektion, die Elektrizität wird bei der Bewegung des Leiters mit derselben Geschwindigkeit mitgeführt, sie haftet an der Materie.

Wird die eine oder die andere Scheibe in einzelne Sektoren eingeteilt mit mehr oder weniger großen isolierenden Zwischenräumen, so kommt bei der Bewegung ein leitender Sektor entweder einem anderen Sektor oder einem Zwischenraum gegenüber zu stehen; das Feld und die elektrische Dichte ändern sich in den leitenden Sektoren mit der Zeit und es entstehen Konduktionsströme. Diese Konduktionsströme sind leicht zu beobachten entweder durch ihre dämpfende Wirkung auf leichte bewegliche Leiter*) oder direkt mit dem Telephon als Wechselströme**), oder endlich durch ihre magnetischen Wirkungen.***) Wollen wir also die magnetische Wirkung eines Konvektionsstromes unter reinen Verhältnissen studieren, so müssen wir für den Versuch, streng genommen, nur volle leitende Scheiben, d. h. wirkliche Rotationskörper benutzen und keine Sektoreneinteilung zulassen.†)

*) H. Hertz, Wied. Ann. **13**, 267, 1881; A. Eichenwald, Ann. d. Phys. **11**, 28, 1903.

**) A. Eichenwald, l. c., S. 25, 1903.

***) H. v. Helmholtz, Ges. Abhandl. **1**, 793; A. Eichenwald, l. c., 26, 27, 1903.

†) Bei der Kritik der Crémieuschen Versuche hat H. A. Wilson (Phil. Mag. (6) **2**, 150, 1901) ihm den Vorwurf gemacht, daß bei ihm die Sektoren wahrscheinlich schlecht voneinander isoliert waren. Auch A. Potier (Éclair. électr. 25, 352, 1900) und H. C. Pocklington (Phil. Mag. (6) **1**, 325, 1901) hielten die Sektoreneinteilung für nötig. Wir kommen hier gerade zum entgegengesetzten Resultate: die Sektoren brauchen gar nicht isoliert zu werden und überhaupt ist die Sektoreneinteilung überflüssig, wenn auch bei kleinen Zwischenräumen sie keinen merklichen Schaden mit sich bringt. Die Versuchsanordnung von E. Adams[11]) mit bewegten Kugeln ist in bezug auf die Reinheit der Konvektion auch nicht einwandfrei und die V. Crémieusche Beobachtungsmethode der Induktionsströme noch weniger.

Weitere Diskussionen über hierher gehörige Fragen vergl.: H. Poincaré et A. Potier, Éclair. électr. **31**, 83, 1902; A. Righi, Phys. Zs. **3**, 310, 409, 449, 1902; T. Levi-Civita, Rend. R. Acc. d. Linc. (5) **11**, 1902; Nuov. Cim. (5) **6**, 141, 1903; G. Picciati, Rend. R. Acc. d. Linc. (5) **13**, 181, 1904.

In allen diesen Fällen bewegter Leiter zeigt sich die Maxwell-Hertzsche wie auch die Lorentzsche Theorie mit den Versuchen in voller Übereinstimmung.

5. Bewegte Dielektrika.

Bis jetzt haben wir unter bewegter Ladung immer die elektrische Ladung eines Leiters, also die „wahre Ladung“ verstanden. Wie steht es denn mit den fingierten Ladungen, die auf der Oberfläche eines ungeladenen Dielektrikums in einem elektrostatischen Felde induziert werden, — erzeugen sie bei der Bewegung des Dielektrikums auch ein magnetisches Feld?

Die Versuche von W. C. Röntgen[5]) gaben auf diese Frage, wenn auch nur in qualitativer Hinsicht, eine positive Antwort. W. Röntgen ließ eine horizontale Glas- oder Ebonitscheibe zwischen zwei geladenen Metallscheiben um eine vertikale Achse rotieren und konstatierte dabei die Ablenkungen einer in der Nähe aufgehängten Magnetometernadel. Diese Ablenkungen waren in dem erwarteten Sinne, wenn man die bewegten fingierten Ladungen als fingierte Ströme entsprechender Richtung auffaßte, sie waren aber so klein, daß keine Messungen möglich waren. Absolute Messungen bekommen hier besonderes Interesse, weil gerade für die Dielektrika die elektromagnetische Theorie für bewegte Körper von C. Maxwell und H. Hertz einerseits und die Elektronentheorie von H. Lorentz anderseits verschiedene Resultate erwarten lassen.

In den erstgenannten Theorien nämlich wird vorausgesetzt*), „daß der elektrische und magnetische Zustand des raumerfüllenden Mediums für jeden Punkt vollständig bestimmt sei durch je eine einzige Richtungsgröße“, daß also bei der Bewegung des Körpers das ganze raumerfüllende Medium mitbewegt wurde, daß „der hypothetisch im Inneren der ponderablen Materie vorausgesetzte Äther sich nur zugleich mit dieser bewege“. Der bekannte Versuch von Fizeau mit dem strömenden Wasser und der Mitführungskoeffizient von Fresnel wird in den Rahmen dieser Theorie nicht aufgenommen.

Nach den Ansichten von Fresnel dagegen ist die Dichte des Äthers in verschiedenen Körpern verschieden und proportional dem Quadrat des Brechungsexponenten n. Bewegt sich irgendein Körper, so wird sich mit ihm nur der Überschuß der Ätherdichte $n^2 - 1$ über der Dichte des freien Äthers $= 1$ mitbewegen; es wird demnach nur der

*) H. Hertz, Wied. Ann. **41**, 369, 1890; Ges. Abhandl. II, S. 256, 257.

$\frac{n^2-1}{n^2}$ Teil des im bewegten Körper eingeschlossenen Äthers mitbewegt und diesen Quotient nennt man den Fresnelschen Mitführungskoeffizienten.

Vom elektromagnetischen Standpunkte aus ist nach Maxwell $n^2 = \varepsilon$ und der Fresnelsche Mitführungskoeffizient wird $\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}$ sein. Das heißt mit anderen Worten, daß bei der Bewegung eines Dielektrikums nicht die ganze in ihm herrschende elektrische Erregung εE an der Bewegung des Körpers teilnimmt, sondern nur der $\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}$ Teil dieses Feldes, also nur $(\varepsilon - 1) E$.

Nach der Elektronentheorie ist gerade das von den Elektronen im Dielektrikum erregte Feld, d. h. die Polarisation gleich $(\varepsilon - 1) E$ und eben dieses Feld wird von den Elektronen bei ihrer Bewegung mitgeführt, der Rest $\varepsilon E - (\varepsilon - 1) E = E$ bleibt im ruhenden Äther stehen. Die Elektronentheorie führt also direkt zu dem Fresnelschen Mitführungskoeffizienten und gibt eine Erklärung des Fizeauschen Experiments. Gleichzeitig fordert diese Theorie, daß die Bewegung der Dielektrika in einem elektrostatischen Felde von einem magnetischen Felde begleitet wird, welches proportional zu $(\varepsilon - 1) E$ sein soll und nicht proportional zu εE, wie es nach der Hertzschen Theorie bei mitbewegtem Äther sein würde.

Wir sehen also, daß die Versuche über die magnetischen Wirkungen der bewegten Dielektrika im elektrostatischen Felde einerseits und die Fizeauschen Versuche über den Einfluß des bewegten Wassers auf die Lichtgeschwindigkeit anderseits sehr nahe miteinander verwandt sind, denn in allen diesen Versuchen spielt derselbe Fresnelsche Mitführungskoeffizient eine wichtige Rolle. Die nahe Verwandtschaft dieser in so verschiedenen Gebieten der Physik liegenden Fragen ist W. Röntgen nicht entgangen, denn wir lesen in seiner oben zitierten Arbeit: „Es wäre mir namentlich von großem Interesse gewesen, zu erfahren, ob dasjenige Medium, in welchem die dielektrische Polarisation stattfindet, die Bewegungen der ponderablen Teilchen vollständig mitmacht oder sich ähnlich wie der Lichtäther nach Fresnels Ansicht verhält. In der Tat sind die sich nach dieser Richtung hin eröffnenden Perspektiven zu verlockend, um nicht alles zu versuchen, was zu einem entscheidenden Resultat führen könnte. Indes blieben, wie schon gesagt, meine Bemühungen bis jetzt erfolglos.“

In der jüngsten Zeit hat H. Pender*) die Crémieusche Induktionsmethode benutzt, um auch das magnetische Feld bewegter Dielektrika, also fingierter Ladungen zu untersuchen und erhielt bei einer Potentialdifferenz von 7470 Volts und 57,8 Umdrehungen der Scheibe in der Sekunde einen doppelten Ausschlag im Galvanometer von 4,5 mm. Die nach den Anschauungen der Elektronentheorie gemachten Rechnungen ergaben einen Ausschlag von 4,85 mm. Die Übereinstimmung der Theorie mit dem Versuche muß als eine sehr gute angesehen werden, wenn man noch bemerkt, daß die Rechnung ein homogenes Feld voraussetzt, welche Bedingung bei dem Versuche mit einer Scheibe ohne Schutzring, gerade an den Stellen, wo der Konvektionsstrom am größten ist, nämlich an den Rändern der Scheibe, nicht erfüllt war. Jedenfalls zeigen die Versuche von H. Pender, daß eine bewegte fingierte Ladung auch ein magnetisches Feld erzeugt, wie eine wahre elektrische Konvektion. Bei meinen eigenen Untersuchungen**) habe ich aus den oben angegebenen Gründen ausschließlich statische elektrische Felder erzeugt und statische magnetische Felder mit dem Magnetometer direkt beobachtet. Zu den Versuchen diente derselbe Apparat, welcher zur Untersuchung der magnetischen Wirkungen bewegter Leiter, also wahrer elektrischer Konvektion benutzt worden war. Wegen der hier bei den Dielektrika noch hinzukommenden Vorsichtsmaßregeln verweise ich auf die Originalarbeit.

Die zahlreichen Versuche beziehen sich auf folgende Fälle: in einem geladenen Kondensator werden bewegt

1. die Belegungen bei stillstehendem Dielektrikum,
2. das Dielektrikum allein,
3. das Dielektrikum mit der einen Belegung, indem die andere Belegung stillsteht, und endlich
4. es wird der Kondensator als Ganzes bewegt, das Dielektrikum mit den beiden Belegungen zusammen. In allen diesen Fällen wurde das erzeugte magnetische Feld mit dem Magnetometer gemessen und mit der Theorie verglichen.

Der zweite Fall ist von mir in verschiedener Weise untersucht worden.

Erstens wurden relative Messungen gemacht, die Versuchsanordnung aber so getroffen, daß die Ausschläge der Magnetnadel möglichst

*) H. Pender, Phil. Mag. (6) **5**, 42, 1903.
) A. Eichenwald, Ann. d. Phys. **11, 421, 1903; **13**, 919, 1904.

groß ausfielen; bei Potentialdifferenzen der unbeweglichen Belegungen von 1200 bis 12000 Volts und bei Geschwindigkeiten von 71 bis 140 Umdrehungen des Dielektrikums in der Sekunde erhielt ich Ausschläge der Magnetnadel von 3,1 bis 44,8 mm bei 2 m Skalenabstand. Die Proportionalität des Magnetfeldes und des fingierten Konvektionsstromes ergab sich mit einer Genauigkeit von etwa ± 5 Proz.

Zweitens wurde möglichst homogenes Feld mit dielektrischen Schutzringen benutzt und absolute Messungen angestellt. Diese Messungen können einen wahrscheinlichen Fehler von etwa 2,7 Proz. enthalten, und in denselben Grenzen liegt auch die Übereinstimmung mit der Theorie.

Dieser zweite Fall mußte schon deswegen mit der größten Genauigkeit untersucht werden, weil die bewegten Dielektrika von den unbewegten Belegungen durch Luftschichten getrennt waren, welche, wenigstens teilweise, bei der Bewegung auch mitgerissen werden. Nach der Elektronentheorie hat die bewegte Luft auf die magnetischen Wirkungen keinen bemerkbaren Einfluß, denn für sie ist $(\varepsilon - 1)$ sehr klein; nach der Hertzschen Theorie aber wird durch diese Komplikation die Rechnung sehr erschwert, denn die Geschwindigkeit der Luft ist schwer zu bestimmen.

6. Bewegter Kondensator.

Ganz frei von dieser Schwierigkeit bleibt der letzte Fall, wo das Dielektrikum ohne Luftschichten samt den fest anliegenden Belegungen rotiert. Hier fallen die wahren und die fingierten Ladungen in entsprechenden Ebenen zusammen, und da die wahre und die fingierte Ladung in jeder Ebene, wo das Dielektrikum vom Leiter begrenzt wird, von entgegengesetztem Zeichen sind, so wird die beobachtete magnetische Wirkung ihrer Differenz, d. h. der freien elektrischen Ladung, proportional sein. Nach der Hertzschen Theorie dagegen würden wir in diesem Falle überhaupt keine magnetischen Wirkungen beobachten können.

Der Versuch entscheidet unzweideutig gegen die Hertzsche und zugunsten der Lorentzschen Theorie.

7. Der Verschiebungsstrom.

Meinen Apparat habe ich noch benutzt, um die magnetischen Wirkungen eines Verschiebungsstromes zu untersuchen, welcher entsteht, wenn sich das Dielektrikum in einem inhomogenen elek-

trischen Felde bewegt. W. C. Röntgen[5]) war der erste, welcher diese Wirkung qualitativ konstatiert hat.

In diesem Falle bleibt das elektrische Feld selbst in Ruhe, nur die einzelnen Stellen des Dielektrikums kommen bei ihrer Bewegung in elektrische Felder von verschiedener Intensität.*) Infolgedessen entsteht hier eine zeitliche Änderung der Polarisation nur in bezug auf das bewegte Dielektrikum; im Äther selbst bleibt das Feld mit der Zeit unverändert. Die magnetische Wirkung dieses besonderen Verschiebungsstromes wird demnach nur der zeitlichen Änderung der Polarisation $(\varepsilon - 1)E$, nicht der Erregung εE proportional sein.

Die von mir in dieser Richtung angestellten quantitativen Versuche stehen auch mit der Elektronentheorie in Übereinstimmung.

8. Elementare Theorie.

Wir können jetzt alle Fälle, wo durch die Bewegung der Körper im elektrostatischen Felde ein magnetisches Feld erzeugt wird, folgendermaßen zusammenstellen.

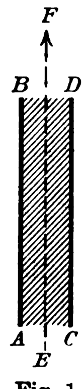


Fig. 1.

Stellen wir (Fig. 1) uns einen Kondensator vor, welcher aus zwei parallelen ebenen Belegungen und einem zwischen denselben eingeschlossenen Dielektrikum, von der Dielektrizitätskonstante ε, besteht. Die Feldintensität sei E, dann haben wir:

a) Die wahre Ladungsdichte an den Belegungen

$$\pm \varrho = \frac{\varepsilon E}{4\pi}.$$

*) Dieser Verschiebungsstrom im Dielektrikum ist dem Konduktionsstrom im Leiter analog.

b) Die fingierte Ladungsdichte am Dielektrikum

$$\pm\varrho' = \frac{-(\varepsilon-1)\cdot E}{4\pi}.$$

c) Die freie Ladungsdichte

$$\varrho'' = \pm\varrho \pm \varrho' = \pm\frac{E}{4\pi}.$$

Werden diese Ladungen in der Richtung parallel den Ebenen des Kondensators mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit v bewegt, so entstehen magnetische Felder:

$$M = A\cdot\frac{v}{c}\cdot\frac{\varepsilon E}{4\pi} = A\cdot\beta\cdot\varrho,$$

$$M' = -A\cdot\frac{v}{c}\cdot\frac{(\varepsilon-1)E}{4\pi} = A\cdot\beta\cdot\varrho',$$

$$M + M' = A\cdot\frac{v}{c}\cdot\frac{E}{4\pi} = A\cdot\beta\cdot\varrho''.$$

A ist ein Proportionalitätsfaktor, welcher von dem Orte, wo die magnetische Kraft beobachtet wird, abhängt. A läßt sich ganz ebenso berechnen, als wenn die Konvektionsströme durch gewöhnliche Leitungsströme ersetzt wären. Unter $c = 3\cdot 10^{10}$ ist das Verhältnis der elektrostatischen zu den elektromagnetischen Einheiten zu verstehen. In den Formeln für die magnetische Kraft kommt immer das Verhältnis

$$\beta = \frac{v}{c}$$

der Geschwindigkeit des Körpers zu der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum vor.

Verschiedene Fälle können vorkommen:

1. Fall. Es bewege sich die eine Belegung AB allein; dann ist die magnetische Kraft am Magnometer M

$$M_1 = A_1\cdot\beta\cdot\varrho.$$

Für die andere Belegung CD, wo die Ladungsdichte $-\varrho$ ist, haben wir

$$M_2 = -A_2\cdot\beta\cdot\varrho.$$

Bewegen sich beide Belegungen in derselben oder in der entgegengesetzten Richtung bei stillstehendem Dielektrikum, dann ist

$$M = M_1 \pm M_2 = (A_1 \mp A_2)\cdot\beta\varrho\cdot = (A_1 \mp A_2)\beta\cdot\frac{\varepsilon E}{4\pi}.$$

Diese Formel ist von mir für verschiedene ε geprüft worden.

2. Fall. Es bewege sich das Dielektrikum allein, dann gibt die Ebene AB

$$M_1' = A_1\beta\varrho'$$

und die Ebene CD

$$M_2' = -A_2 \beta \varrho'.$$

Beide zusammen geben

$$M' = (A_1 - A_2) \beta \varrho'.$$

3. Fall. Es soll sich jetzt die eine Hälfte des Kondensators bewegen, nämlich $ABFE$; dann haben wir:

von der Fläche AB (freie Elektrizität)

$$M_1'' = A_1 \beta \varrho'',$$

von der Fläche FE (fingierte Elektrizität)

$$M_3' = A_3 \beta \varrho',$$

zusammen

$$M_a = \left[A_1 + A_3 (\varepsilon - 1)\right] \beta \frac{E}{4\pi}.$$

Diese Formel wurde von mir experimentell geprüft und entspricht den Tatsachen.

Für sehr dünne dielektrische Schichten wird sich A_1 von A_3 wenig unterscheiden und wir erhalten

$$M = A_1 \beta \frac{\varepsilon E}{4\pi},$$

dieselbe magnetische Wirkung, wie bei der wahren elektrischen Konvektion allein. Man darf also den bewegten Leiter mit einer sehr dünnen Schicht irgendeines Dielektrikums (z. B. mit einer Glimmerschicht, wie bei V. Crémieu) bedecken, ohne dadurch die magnetischen Wirkungen der wahren Konvektion zu vermindern.*)

Bewegt sich die andere Hälfte $FEDC$ des Kondensators, so ist

$$M_b = \left[-A_2 - A_3 (\varepsilon - 1)\right] \beta \frac{E}{4\pi}.$$

4. Fall. Bewegt sich der Kondensator als Ganzes, das Dielektrikum und die Belegungen zusammen, so beobachten wir eine magnetische Feldintensität mit dem Magnetometer

$$M = M_a + M_b = (A_1 - A_2) \beta \frac{E}{4\pi},$$

welche, bei gegebener elektrischer Feldintensität E (oder bei gegebener Potentialdifferenz im Kondensator), von der Dielektrizitätskonstante des bewegten Dielektrikums unabhängig bleibt.

Dieses wird durch den Versuch direkt bestätigt.

Endlich wollen wir einen Fall der Bewegung im inhomogenen elektrischen Felde betrachten. Es seien zum Beispiel (Fig. 2) zwischen

*) Vergl. dagegen V. Crémieu und H. Pender[12]), l. c. und auch W. Sutherland, The Crémieu-Pender discovery. Phil. Mag. (6) 7, 405, 1904.

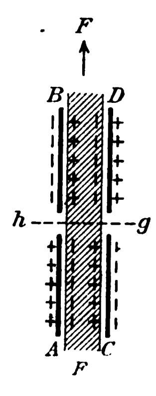


Fig. 2.

den unbeweglichen Leitern A und C einerseits und B und D anderseits zwei elektrische Felder hergestellt, die aber entgegengesetzt gerichtet sind, und es bewege sich zwischen ihnen irgendein Körper EF. Aus der Figur ist leicht zu ersehen, daß in diesem Falle während der Bewegung in der Richtung EF im Körper bei gh eine zeitliche Änderung der Ladungsdichte eintreten muß. Ist EF ein Leiter, so wird von g nach h ein Konduktionsstrom fließen, ist es ein Dielektrikum, so entsteht in derselben Richtung ein Verschiebungsstrom. Im bewegten Körper selbst entstehen diese Ströme zu verschiedenen Zeiten an verschiedenen Stellen, im Raume bleiben diese Ströme stehen und ihre magnetischen Wirkungen können mit einem bei gh aufgestellten Magnetometer gemessen werden. Im Falle, daß EF ein Leiter ist, sind die magnetischen Wirkungen proportional zu $\beta\varrho$, im Falle eines Dielektrikums proportional zu $\beta\varrho'$.

Auch dieses bestätigt der Versuch.

9. Resultate.

Wie weit die angestellten Versuche mit der Theorie in Übereinstimmung stehen, zeigt die folgende Tabelle, welche die aus den verschiedensten Versuchen und von verschiedenen Beobachtern berechneten Werte der universellen Konstante c enthält.

Das große Versuchsmaterial, das wir jetzt besitzen, erlaubt uns mit Sicherheit folgendes zu behaupten.

1. Bei der Bewegung der Körper im elektrostatischen Felde entstehen im allgemeinen Konvektions-, Konduktions- und Verschiebungsströme; alle diese Ströme sind in bezug auf magnetische Wirkungen

Beobachter	c von — bis	c Mittelwert	Methode
1. Wahre elektrische Konvektion.			
H. Rowland und C. Hutchinson	2,26—3,78	3,19	direkt
H. Pender	2,75—3,23	3,05	Induktion
„	2,92—3,04	3,00	Induktion
A. Eichenwald	2,86—3,15	2,99	direkt
F. Himstedt	2,70—3,29	3,04	direkt
„	2,68—3,24	2,99	direkt
V. Karpen	2,70—3,50	2,90	Induktion
2. Fingierte elektrische Konvektion.			
H. Pender	—	3,23	Induktion
A. Eichenwald	2,90—2,95	2,93	direkt
3. Es wird die eine Belegung des Kondensators mit dem Dielektrikum bewegt.			
A. Eichenwald	2,83—3,16	2,98	direkt
4. Es wird der Kondensator als Ganzes bewegt.			
A. Eichenwald	2,96—3,19	3,06	direkt
„	2,88—3,05	2,99	direkt
5. Der Verschiebungsstrom.			
A. Eichenwald	—	2,76	direkt

den Wirkungen eines galvanischen Stromes von gleichem numerischen Betrage völlig äquivalent.

2. Im bewegten Leiter bildet die wahre Elektrizität den Konvektionsstrom, in einem Dielektrikum ist das die fingierte Elektrizität. Das stimmt mit den Anschauungen der Elektronentheorie überein.

3. Im Falle reiner elektrischer Konvektion sind die Bewegungen und die magnetischen Wirkungen der bewegten Ladungen unabhängig voneinander; sie superponieren sich einfach.*) Die Ladungen haften an der Materie.

4. Alle beobachteten Ströme bilden stets geschlossene Stromkreise.

5. Die Versuche sind mit der Annahme eines überall, auch in den bewegten Dielektrika, ruhenden Äthers im Einklange.

Noch eine wichtige Bemerkung muß hinzugefügt werden.

*) Vergl. A. Eichenwald, Ann. d. Phys. **18**, 937, 942, 1904.

Die in den verschiedenen Versuchen benutzten Geschwindigkeiten der Ladungen übertreffen nicht $1{,}5 \cdot 10^4$ cm/sec.; das Verhältnis $\beta = \frac{v}{c}$ war also höchstens $0{,}5 \cdot 10^{-6}$. Die besten Versuche waren mit einem möglichen Fehler von etwa 3 Proz. behaftet. Wenn also die Versuche die Abhängigkeit des Magnetfeldes der elektrischen Konvektion von der ersten Potenz des β festzustellen erlauben, so sind sie gar nicht imstande, den etwaigen Einfluß des β^2 zu entdecken.

Dasselbe gilt für den Versuch von Fizeau über den Einfluß des strömenden Wassers auf die Lichtgeschwindigkeit.

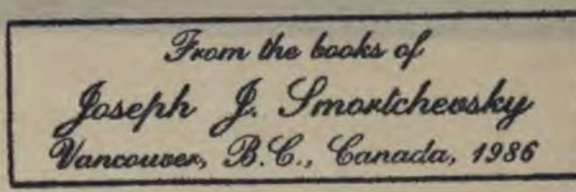
Wenn also alle diese Versuche gegen die Maxwell-Hertzschen elektrodynamischen Gleichungen bewegter Körper und zugunsten der Lorentzschen Elektronentheorie sprechen, so können sie dennoch zwischen den neueren Theorien von H. Lorentz und E. Cohn nicht entscheiden.

Moskau, Ingenieur-Hochschule. 9. Februar 1908.

(Eingegangen 12. Februar 1908.)



Druck von August Pries in Leipzig.


From the books of
Joseph J. Smortchevsky
Vancouver, B.C., Canada, 1986

DATE DUE			

DATE DUE			

